

RATAHALLINTOKESKUS

Suomen rautatieliikenteen polttoaineperäisten päästöjen aiheuttamat ympäristökustannukset

LOPPURAPORTTI 60K01576-Q070-010
Marraskuu 1998



ENERGIA-EKONO

Jaakko Pöyry Group

TIIVISTELMÄ

Projektin tavoitteena oli määrittää, mitata ja arvottaa rautatieliikenteen polttoainepe-
räisten päästöjen aiheuttamat ympäristökustannukset. Tarkastelukohteena oli VR Osa-
keyhtiön sekä diesel- että sähkövetoinen junaliikenne sekä rautatieinfrastruktuuriin
kuuluvien sähkölaitteiden käyttö vuonna 1996. Dieselvetoisessa junaliikenteessä haitta-
arviot kohdennettiin erikseen taajamille ja haja-asutusalueille. Sähkövetoisen junalii-
kenteen ympäristökustannukset arvioitiin sähkön hankinnan aiheuttamiin haittoihin pe-
rustuen.

Arvottamismenetelmänä käytettiin nelivaiheista vaikutuspolkumenetelmää (Impact
Pathway Method). Työvaiheet sisälsivät päästö- ja pitoisuusarviot, arvion ympäristö-
kuormituksen määrällisistä vaikutuksista sekä näiden vaikutusten taloudellisesta arvos-
ta. Tarkasteltavia vaikutuksia olivat terveysvaikutukset (kuolleisuus ja sairastuvuus),
materiaalivaikutukset (korroosio ja likaantuminen), luontovaikutukset (metsä- ja sato-
vauriot) sekä ilmastonmuutos. Tarkasteluissa olivat mukana koko polttoaineketjut eli
muutkin vaiheet kuin polttoaineiden ja sähkön käyttö.

Dieselvetoisen junaliikenteen kokonaishaitoiksi arvioitiin 69,6 milj. mk vuodessa. Tästä
terveysvaikutukset muodostivat 30,2 milj. mk, materiaalivauriot 1,4 milj. mk (sisältäen
resuspension haitat), luontovaikutukset 1,6 milj. mk ja ilmastonmuutoksen haitat
36,4 milj. mk. Taajama-alueilla haitta arvioitiin 32,6 milj. markaksi vuodessa ja haja-
asutusalueilla 37,0 milj. markaksi vuodessa. Polttoaineketjun alkupään haitoiksi arvioi-
tiin lisäksi noin 0,5 milj. mk vuodessa.

Arvio sähkövetoisien liikenteen tarvitseman sähkön hankinnan haitoista perustui aiem-
min samoin menetelmin tehtyyn selvitykseen, jossa arvioitiin Suomen energiantuotan-
non ympäristökustannukset. Sähkön hankinnan haitoiksi arvioitiin kulutetulle sähkölle
5,8 p/kWh ja vuositasolla yhteensä 24,5 miljoonaa markkaa. Tämän lisäksi liikennöin-
nin ilmaan nostattaman pölyn eli resuspension arvioitiin aiheuttavan 1,1 milj. mk vuo-
tuaisen haitan, jolloin kokonaishaitat olisivat 25,6 milj. mk vuodessa. Polttoaineketjujen
alkupään haitoiksi arvioitiin lisäksi 0,8 milj. mk vuodessa.

Taulukossa 1 on esitetty yhteenveto haitoista. Sähkövetoisien junaliikenteen haittoja ei
ole tarkoituksenmukaista eritellä taajamille ja haja-asutusalueille.

*Taulukko 1 VR Osakeyhtiön liikennöinnin aiheuttamat ympäristökustannukset, milj.
mk/a (1997 rahassa)*

	Taajamat	Haja-asu- tusalueet	Polttoaineket- jujen alkupää	Yhteensä
Dieseljunaliikenne	32,6	37,0	0,55	70,2
Sähköjunaliikenne		25,6	0,78	26,4
Yhteensä		95,2	1,3	96,5

Täten koko rautatieliikenteen yhteenlasketuiksi haitoiksi arvioitiin 96,5 milj. mk, josta
polttoaineketjujen alkupäässä arvioitiin syntyvän yhteensä noin 1,3 milj. mk vuosihaitat.

Lisäksi osa Suomessa syntyvistä päästöistä kulkeutuu ulkomaille, mutta niiden aiheuttamia kustannuksia ei ole tässä selvityksessä arvioitu.

Taulukossa 2 on esitetty dieseljunaliikenteen arvioidut haittojen yksikkökustannukset eri päästöille kohdistettuna. Resuspensiosta aiheutuvan likaantumishaitan yksikkökustannus on sama kuin sähkövetoisessa junaliikenteessä. Dieselvetoisen junaliikenteen päästöjen aiheuttaman likaantumishaitan kustannukset kohdistettiin suoraan eri päästökomponenteille.

Taulukko 2 Dieseljunaliikenteen ympäristökustannukset päästökomponenteittain ja eriteltynä taajamissa ja haja-asutusalueilla tapahtuvalle liikennöinnille sekä keskimäärin vuonna 1996 (vuoden 1997 rahassa)

Komponentti	Yksikkö	Taajamat	Haja-asutusalueet	Keskimäärin
SO ₂	mk/t	245 000	9 000	47 000
NO _x	mk/t	23 000	1 400	5 000
Dieselhiukkaset	mk/t	920 000	26 400	171 000
CO	mk/t	100	4	20
Hiilivedyt	mk/t	720	720	720
CO ₂	mk/t	191	191	191
Likaantuminen (resuspensio)	mk/jkm	0,76	0,0011	0,04

Haitta-arviot suhteutettiin myös suoritteisiin (ks. taulukko 3). Tuloksista havaitaan, että sähkövetoisen junaliikenteen haitat liikennesuoritetta kohden ovat sekä henkilö- että tavaraliikenteessä selvästi pienemmät kuin dieselvetoisen junaliikenteen. Mikäli polttoaineketjujen alkupään haitat otetaan huomioon, on dieselvetoisen junaliikenteen haitta-arvioihin lisättävä 0,8 % ja sähkövetoisen junaliikenteen 3,2 %. Tämä pienentää hieman sähkövetoisen junaliikenteen ympäristötaloudellista kannattavuutta dieselvetoiseen junaliikenteeseen verrattuna.

Taulukko 3 Diesel- ja sähkövetoisen junaliikenteen haitat taajamissa ja haja-asutusalueilla tapahtuvassa liikennöinnissä sekä keskimäärin, mk/juna-km, mk/1000 henkilö-km ja mk/1000 tonni-km (1997 rahassa)

		Taajamat	Haja-asutusalueet	Keskimäärin
Mk/jkm	Sähkö	-	-	0,9
	Diesel	48	2,9	5,1
Mk/1000 hkm	Sähkö	-	-	4,2
	Diesel	55	2,9	14
Mk/1000 tkm	Sähkö	-	-	3,6
	Diesel	30	1,6	13

Rautatieliikenteen infrastruktuurin sähkönkulutus oli 65 GWh vuonna 1996. Tämä kohdennettiin diesel- ja sähköjunaliikenteelle suhteessa niiden suoritteeseen (juna-km). Infrastruktuurin sähkönkulutuksen ympäristökustannuksille sovellettiin samaa 5,8 p/kWh yksikkökustannusta kuin sähkövetoiselle liikennöinnille. Lisäksi huomioon otettiin sähkön hankinnan polttoaineketjujen alkupää. Taulukossa 4 esitetyn arvion mukaan infrastruktuurin sähkönhankinnan aiheuttamat ympäristökustannukset olivat noin neljä miljoonaa markkaa vuonna 1996.

Taulukko 4 Rautatieliikenteen infrastruktuurin sähkönhankinnan (kulutus ja polttoaineketjujen alkupää) ympäristökustannukset, milj. mk/a (1997 rahassa)

	Dieseljuna- liikenne (22 GWh)	Sähköjuna- liikenne (43 GWh)	Yhteensä
Kulutuksen kustannukset	1,26	2,48	3,74
Polttoaineketjujen alkupää	0,04	0,08	0,12
Yhteensä, milj. mk/a	1,3	2,6	3,9

Tulokset ovat samansuuntaisia kuin kansainvälisten tutkimusten tulokset. Esimerkiksi Euroopan komission rahoittamissa Externe Transport- ja QUITs-tutkimuksissa on tarkasteltu rautatieliikenteen aiheuttamia ympäristökustannuksia. Kyseisissä tutkimuksissa on saatu sekä sähkö- että dieselvetoisen kaluston osalta suurempia, mutta samaa kerta-luokkaa olevia tuloksia, mikä oli odotettavissa Keski-Euroopan suuremman asukastiheyden vuoksi.

ABSTRACT

The objective of the project was to determine, measure and value the environmental costs caused by railway traffic fuels emissions. The review covered VR Ltd's (Finnish railway operator) diesel and electric train traffic and the use of electrical equipment, part of the railway traffic infrastructure, in 1996. Adverse environmental impacts of diesel train traffic were assessed separately for population centres and rural areas. Environmental costs of electric train traffic were estimated based on impacts of electricity supply.

The valuation method used was the Impact Pathway Method, which consists of four steps: emission inventory, dispersion calculations, quantification of impacts and their monetary valuation. The impacts studied included health effects (mortality and morbidity), materials damage (corrosion and fouling), ecological effects (forest and crop damage) and climate change. Besides the use of fuels, the review studied the entire fuel cycles, including not only the use of fuel and electricity but also all other phases.

The total cost of the damage from diesel train traffic was estimated at FIM 69.6 million per year, of which health effects accounted for FIM 30.2 million, materials damage FIM 1.4 million (resuspension damage included), ecological effects FIM 1.6 million and climate change FIM 36.4 million. The damage in population centres was estimated at FIM 32.6 million per year and in rural areas at FIM 37.0 million per year. In addition, the damage from the fuel cycle (except the fuel consumption) was estimated at approximately FIM 0.5 million per year.

The damage estimate of electricity supply needed by electric train traffic was based on the earlier study on environmental costs of energy production in Finland, which used the same methods as this study. The damage caused by electricity supply was estimated at 5.8 p/kWh of electricity consumed and FIM 24.5 million per year. In addition to this, dust particles raised into the air by traffic, or resuspension, was assessed to cause FIM 1.1 million damage per year, in which case the total damage would be FIM 25.6 million per year. In addition, the damage from the fuel cycles (except the fuel consumption) was valued at FIM 0.8 million per year.

Table 1 shows a summary of environmental damage costs. The figure for the electric train traffic damage is not divided between population centres and rural areas since it is not necessary.

Table 1 Environmental costs caused by VR Ltd's railway operation, FIM million/a (in 1997 money)

	Population centres	Rural areas	Fuel cycles (except fuel consumption)	Total
Diesel train traffic	32.6	37.0	0.55	70.2
Electric train traffic		25.6	0.78	26.4
Total	95.2		1.3	96.5

The combined damage of the entire railway traffic was thus estimated at FIM 96.5 million, of which approximately FIM 1.3 million was due to the fuel cycles (except the fuel consumption). In addition, some of the emissions originating in Finland are transported abroad. However, the costs caused by them are not estimated in this study.

Table 2 shows the estimated unit costs of the damage in diesel train traffic allocated to different emissions. The unit cost of fouling from resuspension is the same as in electric train traffic. But in diesel train traffic, the fouling damage costs of emissions were allocated directly to different emission components as follows:

Table 2 Environmental costs of diesel train traffic by emission component, broken down to traffic in population centres and rural areas and on average in 1996 (in 1997 money)

Component	Unit	Population centres	Rural areas	Average
SO ₂	FIM/t	245 000	9 000	47 000
NO _x	FIM/t	23 000	1 400	5 000
Diesel particles	FIM/t	920 000	26 400	171 000
Carbon monoxide	FIM/t	100	4	20
Hydrocarbons	FIM/t	720	720	720
CO ₂	FIM/t	191	191	191
Fouling (resuspension)	FIM/train-km	0.76	0.0011	0.04

The damage estimates were also proportioned to traffic performance, FIM/km (Table 3). The results show that the damage from electric train traffic per kilometrage in passenger and goods traffic is distinctly smaller than the damage from diesel train traffic. If the damage from the fuel cycle (except the fuel consumption) is taken into account, an additional 0.8% must be added to the damage estimates of diesel train traffic and 3.2% to that of electric train traffic. This reduces slightly the profitability of electric train traffic from an environmental economics point of view compared with diesel train traffic.

Table 3 Damage caused by diesel and electric train traffic in population centres and rural areas and on average, FIM/train-km, FIM/1000 passenger-km and FIM/1000 tonne-km (in 1997 money)

		Population centres	Rural areas	Average
FIM/train-km	Electric	-	-	0.9
	Diesel	48	2.9	5.1
FIM/1000 passenger-km	Electric	-	-	4.2
	Diesel	55	2.9	14
FIM/1000 tonne-km	Electric	-	-	3.6
	Diesel	30	1.6	13

The electricity consumption of the railway traffic infrastructure amounted to 65 GWh in 1996. This was allocated to diesel and electric train traffic in proportion to their kilometrage (train-km). The same 5.8 p/kWh was used to calculate the environmental costs of electricity consumption of infrastructure as was used for electric train traffic. In addition, all other phases of the fuel cycles were taken into account. Table 4 shows that the environmental costs caused by electricity supply for railway traffic infrastructure amounted to approximately FIM 4 million in 1996.

Table 4 Environmental costs of electricity supply (electricity consumption and other phases of the fuel cycle) for railway traffic infrastructure, FIM million/a (in 1997 money)

	Diesel trains (22 GWh)	Electric trains (43 GWh)	Total
Electricity consumption costs	1.26	2.48	3.74
Other phases of the fuel cycle	0.04	0.08	0.12
Total, FIM million/a	1.3	2.6	3.9

The results of this study are very similar to those of international studies. For example, the EU-financed ExternE Transport and QUITs projects have studied environmental costs caused by railway traffic. The results of these studies show higher costs, but of the same order of magnitude, both in electric and diesel train traffic, which was to be expected because of the higher population density in Central Europe.

ESIPUHE

Selvittäessään ratahankkeiden yhteiskuntataloudellisia vaikutuksia Ratahallintokeskus on tähän saakka arvioinut ympäristökustannuksia soveltamalla Tielaitoksen tiehankkeissa käyttämiä yksikköarvoja. Rautatieliikenteelle oli kuitenkin aiheellista laatia erikseen sille ominaiset yksikköarvot, sillä rautatieliikenne ja tieliikenne poikkeavat toisistaan esimerkiksi käytettyjen energialähteiden osalta. Tämä selvitystyö käynnistettiin keväällä 1998 korjaamaan tätä puutetta.

Selvityksen on tehnyt Energia-Ekono Oy:n muodostama asiantuntijaryhmä. Projektin vastuullisena johtajana toimi DI, KTM Tomas Otterström. Projektipäällikkönä sekä projektin pääasiallisena suorittajana toimi DI Lea Gynther sekä projekti-insinööreinä MMK Kari Hämekoski ja KTM Marjo Paavola.

Työn seurantaryhmään osallistuivat tekijöiden lisäksi suunnittelija Harri Lahelma, ylitarkastaja Kari Pulli, ylitarkastaja Anni Rimpiläinen ja suunnittelija Tuomo Suvanto Ratahallintokeskuksesta, ylitarkastaja Mikael Rehula liikenneministeriöstä, suunnittelija Mervi Karhula Tielaitokselta sekä DI Jyrki Pussinen ja DI, MQ Vesa Stenvall VR Osa-
keyhtiöstä.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ESIPUHE

SISÄLLYSLUETTELO

LYHENNELUETTELO

KÄSITELUETTELO

1. JOHDANTO	18
1.1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet	18
1.2 Tutkimusmenetelmät	18
1.3 Tulosten luotettavuus	21
2. KATSAUS KANSAINVÄLISEEN TUTKIMUKSEEN	23
3. RAUTATIELIIKENTEEN PÄÄSTÖT	24
3.1 Polttoaineperäiset päästöt	24
3.1.1 Käyttövaiheen päästöt	24
3.1.2 Dieselin polttoaineketju	25
3.2 Sähköntuotannon päästöt	26
3.2.1 Sähköistysaste	26
3.2.2 Sähkön tuotantovaiheen päästöt	27
3.2.3 Sähkönhankinnan polttoaineketjut	28
3.3 Rautatieliikenteen päästöt yhteensä	30
3.4 Resuspensio	30
4. RAUTATIELIIKENTEEN AIHEUTTAMAT PITOISUUDET	32
4.1 Dieseljunaliikenteen aiheuttamat pitoisuudet	32
4.2 Sähkölunaliikenteen sähkönhankinnan aiheuttamat pitoisuudet	36
5. ARVOTTAMINEN	37
5.1 Dieseljunaliikenteen aiheuttamat ympäristökustannukset	37
5.1.1 Kuolleisuusriski	38
5.1.2 Sairastuvuusriski	41
5.1.3 Rakennusmateriaalien rapautuminen	46
5.1.4 Likaantuminen	48
5.1.5 Happamoittavan laskeuman aiheuttamat metsävauriot	50
5.1.6 Otsonin aiheuttamat metsävauriot	51
5.1.7 Viljelykasvivauriot	52
5.1.8 Ilmastomuutos	54
5.1.9 Dieselin polttoaineketjun haitat	55
5.1.10 Yhteenveto dieseljunaliikenteen haitoista	56
5.1.11 Dieseljunaliikenteen aiheuttaman haitan kohdistaminen suoritteille	57
5.2 Sähkölunaliikenteen aiheuttamat ympäristökustannukset	58
5.2.1 Sähkön hankinnan haitat	58
5.2.2 Sähkön hankinnan polttoaineketjujen haitat	59
5.2.3 Resuspension aiheuttama likaantuminen	60
5.2.4 Yhteenveto sähköjunaliikenteen haitoista	61
5.2.5 Sähkölunaliikenteen aiheuttaman haitan kohdistaminen suoritteille	61
6. TULOSTEN LUOTETTAVUUDEN ARVIOINTIA	63
6.1 Epävarmuustekijät	63

6.2 Herkkyystarkastelu	65
6.2.1 Kuolleisuusriski	66
6.2.2 Sairastuvuusriski	67
6.2.3 Rakennusmateriaalien rapautuminen	68
6.2.4 Likaantuminen	69
6.2.5 Happamoittavan laskeuman aiheuttamat metsävauriot	70
6.2.6 Otsonin aiheuttamat metsävauriot	71
6.2.7 Viljelykasvivauriot	71
6.2.8 Ilmastomuutos	72
6.2.9 Sähkön hankinta	73
6.2.10 Yhteenveto herkkyystarkastelun tuloksista	74
7. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	76
LÄHDELUETTELO	

LIITTEET I Suomen rataverkko

II Tutkimuksia liikenteen päästöjen ympäristökustannuksista

LYHENNELUETTELO

Kirjainlyhenteitä

BKT	Bruttokansantuote
CV / CVM	Subjektiiivisten arvostusten menetelmä (Contingent Valuation Method)
ECU	Euroopan Unionin valuuttayksikkö
EU	Euroopan unioni
hkm	Henkilökilometri
jkm	Junakilometri
KELA	Kansaneläkelaitos
LIISA	Päästötietojärjestelmä, joka sisältää tieliikenteen päästö- ja energiankulutustiedot
LIPASTO	Päästötietojärjestelmä, joka sisältää kaikkien liikennemuotojen päästö- ja energiankulutustiedot
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
RAD	Rajoittuneen toimintakyvyn päivä (Restricted Activity Day)
RAILI	Päästötietojärjestelmä, joka sisältää rautatieliikenteen päästö- ja energiankulutustiedot
RHA	Hengitystieoireilusta johtuvat sairaalasisäännot (Respiratory Hospital Admissions)
RHK	Ratahallintokeskus
SIHTI	Energia- ja ympäristöteknologian tutkimusohjelma
SJ	Statens Järnvägar
SWEEA	Swedish Economic and Environmental Accounts
tkm	Tonnikilometri
UIC	International Union of Railways
UN ECE	YK:n Euroopan talouskomissio
YOLL	Menetetyt elinvuodet (Years of Life Lost)

Alkuaineet ja kemialliset yhdisteet

CO	Hiilimonoksidi eli häkä
CO ₂	Hiilidioksidi
HC	Hiilivedyt
NMVOC	Haihtuvat hiilivedyt lukuunottamatta metaania (Non-Methane Volatile Organic Compounds)
NO _x	Typen oksidit
O ₃	Otsoni
PM _{2,5}	Pienhiukkaset, halkaisija alle 2,5 µm
PM ₁₀	Hengitettävät hiukkaset, halkaisija alle 10 µm
SO ₂	Rikkidioksidi
TSP	Kokonaisleijuma
VOC	Haihtuva orgaaninen yhdiste (Volatile Organic Compound)

Yksiköjä

a	vuosi
h	tunti
GWh	gigawattitunti, miljardi wattituntia
kg	kilogramma, tuhat grammaa
kWh	kilowattitunti, tuhat wattituntia
$\mu\text{g}/\text{m}^3$	mikrogrammaa (gramman miljoonasosaa) kuutiometrissä
μm	mikrometri, metrin miljoonasosa
mg/m^3	milligrammaa (gramman tuhannesosaa) kuutiometrissä
MJ	megajoule, miljoona joulea
m^2	neliömetri
m^3	kuutiometri
ppb	miljardisosa (parts per billion)
ppb-h	kynnysarvon ylittävän otsonialtistuksen yksikkö (ppb-tunteja)
t	tonni
TWh	terawattitunti, 10^{12} wattituntia

KÄSITELUETTELO

"Akuutti kuolleisuus"	Ilmansaasteiden aiheuttama äkillinen kuolemantapaus.
Altistus-vaikutusfunktio	Funktio, joka yhdistää ilman epäpuhtauspitoisuuden muutoksen ympäristöhyödykkeen laadussa tai määrässä tapahtuvaan muutokseen
Arvo	Asian kokonaismerkitys. Jos arvoa mitataan rahassa saadaan <i>hint</i> a. Arvoja on ryhmitelty erilaisiin luokkiin: käyttöarvo, optioarvo, itseisarvo. Englanniksi: <i>Value</i> .
Arvottaminen	Menettely, jossa erimittaisille asioille tai vaikutuksille annetaan yhteismitallinen, yleensä rahallinen <i>arvo</i> .
Bruttotonnikilometri (bt-km)	Liikennesuoritetta kuvaava suure. Rautatieliikenteen bruttotonnikilometrit muodostuvat junan (kalusto+hyötykuorma) painon ja sen ajaman matkan tulona.
Contingent Valuation -menetelmä (CV-menetelmä)	Haastatteluihin perustuva taloudellinen arviointimenetelmä, jossa ihmisiltä kysytään kuinka paljon he olisivat valmiita maksamaan (<i>maksuhalukkuus</i>) tai kuinka paljon heille pitäisi maksaa (<i>hyväksymishalukkuus</i>) tarkastellusta asiasta. Yleensä toteutuksessa on käytetty lähes poikkeuksetta maksuhalukkuutta. Englanniksi: <i>Contingent Valuation/CV Method</i> .
Dieselhiukkaset	Dieselhiukkaset ovat suoraan moottorista peräisin olevia pienhiukkasia.
Diskonttaaminen	Toimenpide, jolla eriaikaiset <i>hyödyt</i> ja kustannukset saadaan vertailukelpoisiksi esimerkiksi investointivaihtoehtojen vertailussa. Käytännössä tämä tehdään <i>laskentakoron</i> avulla ja investoinneille lasketaan useimmiten <i>nykyarvo</i> . Mitä korkeampi korko on, sitä tärkeämpiä lähellä nykyhetkeä toteutuvat <i>hyödyt</i> ja kustannukset ovat verrattuna tulevaisuudessa tapahtuviin. Englanniksi: <i>Discounting</i> .
Elinkaari	Tuotteen vaiheet siihen käytettyjen raaka-aineiden hankinnasta ja tuottamisesta tuotteesta syntyvien jätteiden loppukäsittelyyn. Englanniksi: <i>Life Cycle LC</i> .
Funktio	Matemaattisesti ilmaistu suhde, jossa toisistaan riippumattomien muuttujien avulla voidaan ratkaista niistä riippuvan muuttujan arvo. Esimerkiksi junamatkan kesto riippuu yksinkertaistaen matkan pituudesta ja junan nopeudesta.
Hengitettävät hiukkaset	Hiukkaset, joiden halkaisija on alle 10 µm.
Henkilökilometri (hkm)	Henkilöliikenteen liikennesuoritetta kuvaava suure. Yksi henkilökilometri muodostuu yhden matkustajan matkustaessa yhden kilometrin pituisen matkan.

Hinta	<i>Hyödykkeen hinta osoittaa, mistä sen saamiseksi on luovuttava. Markkinahyödykkeiden hinta voidaan antaa rahassa.</i>
Hiukkaspäästöt	Ilmaan esimerkiksi polton seurauksena joutuvia tai muodostuvia erilaatuisia ja -kokoisia hiukkasia. Ihmiselle vaarallisimpia ovat pienet hiukkaset, joiden läpimitta on pienempi kuin $2,5\ \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$). Myös $10\ \mu\text{m}$ pienemmät hiukkaset aiheuttavat terveysriskejä (PM_{10}). Suuremman kokoluokan hiukkaset aiheuttavat kustannuksia myös likaantumisen kautta.
Hyödyke	Tavara tai palvelu, joka tuottaa saajalle <i>hyötyä</i> .
Hyöty	Termi, joka yhdistetään usein hyvinvointiin. Henkilön voidaan kuitenkin katsoa saavan hyötyä muutoksesta, jos hän mieluummin näkee muutoksen toteutuvan kuin alkuperäisen tilanteen valitsevan.
Ilmastonmuutos	Sääolojen yleisen luonteen muuttuminen pitkällä aikavälillä.
Junakilometri (jkm)	Rautatieliikenteen liikennesuoritetta kuvaava suure. Yksi junakilometri muodostuu henkilö- tai tavarajunan ajaessa kilometrin mittaisen matkan.
Kasvihuonekaasut	Kaasut, jotka aiheuttavat maapallon ilmastonmuutoksen. Tärkein on hiilidioksidi (CO_2). Muita merkittäviä kaasuja ovat metaani (CH_4), typpioksiduuli (N_2O) ja CFC-kaasut.
Kaukokulkeutuminen	Epäpuhtauksien leviäminen päästölähteestä useiden satojen kilometrien etäisyyteen.
"Krooninen kuolleisuus"	Pitkäaikaisesta (vuosien kuluessa tapahtuvasta) ilmansaasteille altistumisesta johtuva eliniän lyheneminen.
Kustannus-hyötyanalyysi	Menetelmä, jossa päätöksestä aiheutuvia <i>hyötyjä</i> ja haittoja verrataan keskenään.
Laskentakorko	Korkokanta, joka ilmaisee ajan merkityksen <i>hyötyjen</i> ja kustannusten <i>arvolle</i> . Jos laskentakorko on 10 %, ovat vuoden kuluttua saatava 110 mk ja kahden vuoden kuluttua saatava 121 mk samanarvoisia kuin heti saatava 100 mk. Kutsutaan myös diskonttoroksi. Englanniksi: <i>Discount rate / Interest rate</i> .
Maksuhalukkuus	Maksimisumma rahaa, jonka yksilö on valmis maksamaan tietystä parannuksesta ympäristön tilassa. Maksuhalukkuus mittaa sekä <i>käyttöarvoja</i> että muita <i>arvoja</i> (<i>olemassaoloarvo</i> , <i>lahjoitusarvo</i> , <i>optioarvo</i>). Englanniksi: <i>Willingness to Pay (WTP)</i> .
Maksuhalukkuusmenetelmä	Ks. <i>contingent valuation</i> .
Markkinahinta	<i>Hinta</i> , jolla <i>hyödykkeen</i> kysyntä ja tarjonta ovat yhtä suuria.
Nykyarvo	Summa, joka saadaan eriaikaisten <i>hyötyjen</i> ja kustannusten <i>diskonttauksen</i> jälkeen ja joka ilmaisee kyseisten hyötyjen ja kustannusten arvon tarkasteluhetkellä. Nykyarvo ei ota huomioon hyötyjen ja kustannusten toteutumisen riskejä.

Pienhiukkaset	Hiukkaset, joiden halkaisija on alle 2,5 µm.
Polttoaineketju	Polttoaineiden jalostamiseen ja käyttöön liittyvistä osaprosesseista ja toiminnoista muodostuva ketju, joka yleensä alkaa luonnonvarojen hankinnasta ja päättyy jätteiden käsittelyyn.
Rajoittuneen toimintakyvyn päivä (RAD)	Päivä, jolloin toimintakyky on sairauden vuoksi selvästi rajoittunut ja sairaus vaatii vuodelepoa, mutta ei sairaalahoitoa. Englanniksi: <i>Restricted activity day</i> .
Resuspensio	Liikenteen ja tuulen maasta nostattama katupöly yms. Kutsutaan myös re-emissioksi.
Sairauskustannukset	Sairauden hoidon kustannukset sekä sairauden aiheuttaman yksilön tuottavuuden menetyksen kustannukset. Englanniksi: <i>Cost of Illness, COI</i> .
Tilastollinen elämän arvo	Ihmisten keskimääräisestä <i>maksuhalukkuudesta</i> kuolemanriskin vähentämiseksi johdettu arvio ihmiselämän keskimääräisestä arvosta. Englanniksi: <i>Value of Statistical Life</i> .
Tonnikilometri (tkm)	Taaraliikenteen liikennesuoritetta kuvaava suure. Yksi tonnikipometri muodostuu yhden tonnin painoisen kuorman matkustaessa yhden kilometrin pituisen matkan.
Top-down-lähestymistapa	Tarkastelutapa, jossa siirrytään kokonaisvaltaisemmasta tarkastelusta kohti spesifisiä, yksityiskohtaisempia arvioita.
Ulkoinen vaikutus	<i>Hyödykkeen</i> tuottamisesta tai kuluttamisesta syntyneet vaikutukset, jotka eivät näy kustannuksissa tai hinnoissa ja vaikuttavat taserajan ulkopuolelle "kolmansiin osapuoliin". Esimerkkejä ovat ilmansaasteiden aiheuttamat sairaudet tai mehiläisfarmin naapurissa asuvien viljelijöiden saamat hyödyt.
Ulkoinen kustannus/hyöty	<i>Ulkoisesta vaikutuksesta</i> aiheutunut taloudellinen haitta/hyöty. Englanniksi: <i>External Cost/Benefit, Externality</i> .
Vaikutuspolkumenetelmä	Euroopan komission rahoittamassa ExternE-tutkimukokonaisuudessa kehitetty nelivaiheinen (päästöt, pitoukset, vaikutukset, kustannukset) ympäristövaikutusten ja -kustannusten arviointimenetelmä. Englanniksi: <i>Impact Pathway Method</i>
Ympäristöhyödyke	Ympäristöön liittyvä, yleensä ilmainen, markkinamekanismin ulkopuolella oleva tavara (esimerkiksi puhdas ilma) tai palvelu (esimerkiksi virkistys).
Ympäristöhaitta	Negatiivinen <i>ympäristövaikutus</i> . Käytetään sekä määrällisen että rahallisen arvon muutoksesta.
Ympäristökustannus	Tässä selvityksessä termiä on käytetty kuvaamaan <i>ympäristöhaittoista</i> aiheutuvaa menetystä rahassa arvotettuna. Ympäristökustannus voi olla ulkoinen tai se voi olla eri tavoin sisäistetty. Ympäristökustannusten laskemiseen on kehitetty erilaisia menetelmiä joiden kattavuus ja luotettavuus vaihtelevat. Muissa yhteyksissä ympäristökustannuksilla tarkoitetaan myös ympäristönsuojelutoimenpiteistä (sisäinen kustannus) aiheutuvaa rahallista menetystä.

Ympäristöhyöty	Positiivinen <i>ympäristövaikutus</i> . Käytetään sekä määrällisen että rahallisen arvon muutoksesta.
Ympäristötalous	Taloustieteen osa, jossa tutkitaan luonnonvarojen käyttöön ja ympäristövaikutuksiin liittyviä taloudellisia ilmiöitä.
Ympäristövaikutus	<i>Ympäristöhyödykkeen</i> laadussa tai määrässä tapahtunut muutos jonkin hankkeen seurauksena. Ympäristövaikutukset kuvataan yleisesti vaikutuksina ihmisten terveyteen, ihmisten hyvinvointiin, luontoon ja koko maailmaan. Ne voivat olla fyysisiä, sosioekonomisia tai psykologisia; ne voidaan jakaa lyhyt- tai pitkäkestoihin vaikutuksiin, ja ne voivat olla taloudellisesta näkökulmasta sisäisiä tai ulkoisia.

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta ja tavoitteet

Projektin tavoitteena on määrittää, mitata ja arvottaa rautatieliikenteen polttoaineperäisten päästöjen aiheuttamat ympäristökustannukset. Tarkastelukohteena on VR Osa-keyhtiön diesel- ja sähkövetoinen rautatieliikenne sekä rataverkkoon kuuluvien sähkölaitteiden energiankulutus.

RHK on ottanut huomioon rautatieliikenteen päästöjen aiheuttamat vaikutukset selvittäessään hankkeiden yhteiskuntataloudellisia vaikutuksia. Ympäristökustannusten arvioinnissa on tähän mennessä sovellettu Tielaitoksen tiehankkeissa käyttämiä yksikköarvoja. Tielaitoksessa laadittiin vuonna 1992 ensimmäinen selvitys tieliikenteen pakokaasujen vaikutuksista sekä niiden kustannuksista. Tehtyjä arvioita täydennettiin ja päivitettiin vuonna 1997. Uusia arvoja ei ole vielä vahvistettu käyttöön.

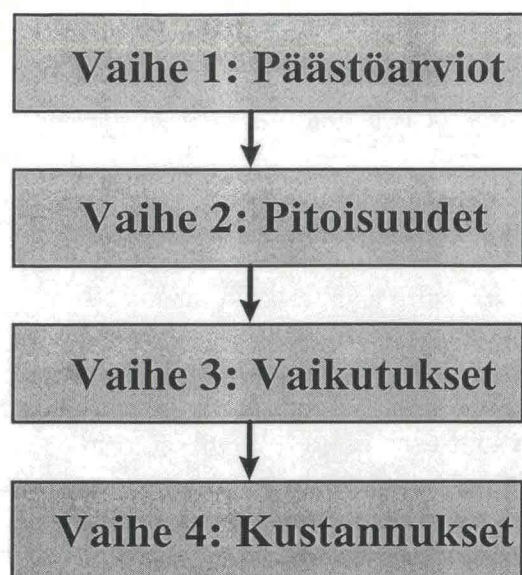
Rautatieliikenteelle oli kuitenkin aiheellista laatia erikseen sille sovellettavat yksikköarvot, sillä liikennemuoto poikkeaa selkeästi tieliikenteestä. Päästöjen laatu, leviäminen (pitoisuudet) ja samalla altistuvat ympäristöhyödykkeet ovat erilaisia. Osa rautatieliikenteen päästöistä muodostuu sähköjunaliikenteen edellyttämän sähkönhankinnan päästöistä dieseljunaliikenteen osuuden koko ajan pienentyessä. Näistä syistä johtuen tieliikenteen päästöjen yksikköarvot eivät sovellu rautatieliikenteen ympäristökustannusten arviointiin.

1.2 Tutkimusmenetelmät

Ilmansaastepäästöjen ympäristökustannusten taloudellisen määrittäminen suoritetaan vaikutuspolkumenetelmällä (Impact Pathway Method). Valittua menetelmää voidaan soveltaa niiden hyvin erilaisten vaikutusten vertailuun, joita liikenteen päästöillä on. Tämä menetelmä tuottaa tietoa muodossa, joka on helposti eri sidosryhmien ymmärrettävissä. Lisäksi tällä arviointimenetelmällä ympäristövaikutusten kustannuksia on mahdollista vertailla ympäristönsuojelutoimenpiteiden kustannuksiin. Haittojen rahallinen arvioiminen parantaa edellytyksiä tehdä taloudellisesti optimaalisia päätöksiä esimerkiksi päästöjen vähentämistoimenpiteistä.

Dieselvetoisen junaliikenteen osalta projektin aikana käydään läpi vaikutuspolkumenetelmän kaikki vaiheet päästöjen aiheuttamille erilaisille vaikutuksille. Sähkövetoisen junaliikenteen osalta käytetään hyväksi aiemmassa tutkimuksessa (Energia-Ekono Oy 1998a) sähköntuotannolle tehtyjä haitta-arvioita.

Seuraavassa kaaviossa on esitetään vaikutuspolkumenetelmän kulku. Sen jälkeen kuvataan yksityiskohtaisemmin sekä menetelmän vaiheita että projektin kulkua. Tielaitokselle laadituissa selvityksissä käytettiin tätä samaa menetelmää.



Kuva 1.1 Vaikutuspolkumenetelmän työvaiheet

Vaihe 1. Päästöarviot

Tässä selvityksessä tarkastellaan dieseljunaliikenteen päästöjä ilmaan vuonna 1996. Päästöt otetaan RAILI-laskentajärjestelmästä. Polttoaineen käytön lisäksi tarkastellaan polttoaineketjun alkupään vaiheita eli tuotantoa, kuljetuksia, jalostusta ja jakelua, jotka edeltävät käyttövaihetta.

Sähköjunaliikenteen kohdalla tarkastellaan sähkön tuotannon aiheuttamia savukaasupäästöjä. Sähköjunaliikenteessä käytettävän sähkön hankinnan oletetaan vastaavan Suomen keskimääräistä sähkönhankintaa, jolloin mukana ovat paitsi fossiiliset ja biopolttoaineet myös ydinvoima, vesivoima ja tuontisähkö. Venäjältä tuotavan sähkön päästöjen oletetaan vastaavan Suomen oman sähköntuotannon keskimääräisiä päästöjä. Muualta tuotavan sähkön päästöt, josta valtaosa tuotetaan Ruotsin ja Norjan vesivoimalaitoksissa, oletetaan nollassa. Arviot perustetaan Tilastokeskuksen raportointiin päästöihin vuonna 1995 ja VR:n sähkön kulutukseen vuonna 1996. Polttoaineketjujen alkupään päästöt ulkomailla ja kotimaassa arvioidaan Energia-Ekono Oy:n aiempien selvitysten pohjalta.

Tutkimuksen kohteena ovat päästöt ilmaan. Tarkasteltavia päästökomponentteja ovat typen oksidit (NO_x), hiilivedyt (HC), hiilimonoksidi (CO), rikkidioksidi (SO_2), hiukaset (TSP, PM_{10} ja $\text{PM}_{2,5}$ mukaanluettuna sekä suorat hiukkaspäästöt että ilmakehässä muodostuva sulfaatti ja nitraatti), päästöistä muodostuva otsoni (O_3) ja hiilidioksidi (CO_2). Eri päästöjen vaikutuksia tarkastellaan vaihtelevalla tarkkuudella, sillä joidenkin päästökomponenttien pitoisuuksista tai vaikutuksista on saatavilla paremmin tietoa kuin toisista.

Vaihe 2. Pitoisuustarkastelut

Tässä vaiheessa arvioidaan dieseljunaliikenteen pakokaasupäästöjen vaikutus ulkoilman epäpuhtauspitoisuuksiin. Tarkastelu suoritetaan erikseen Suomen taajamille ja haja-asutusalueille.

Koska työn puitteissa ei ole mahdollista tehdä leviämismallilaskelmia, arvioidaan pitoisuus sen sijaan ns. top-down-periaatteella. Tällaisessa tarkastelussa pitoisuusarviot lähtevät liikkeelle kunkin epäpuhtauskomponentin vallitsevista kokonaispitoisuuksista. Kokonaispitoisuuksista vähennetään ensin Suomen rajojen ulkopuolelta tuleva kaukokulkeuma (tausta). Jäljelle jäävä pitoisuus kohdistetaan eri sektoreille (liikennesektori, energiantuotanto jne.) kyseisen sektorin päästömäärien suhteessa Suomen kokonaispäästöihin. Rautatieliikenteen osuus arvioidaan suhteessa koko liikennesektorin päästöihin. Suuri osa Suomen rautatieliikenteen päästöistä kulkeutuu Suomen rajojen ulkopuolelle. Näiden päästöjen vaikutusten ja kustannusten arvioiminen on merkittävistä epävarmuustekijöistä johtuen rajattu pois tämän selvityksen tarkastelusta. Tämä johtaa jonkinasteiseen aliarvioon haittojen määrästä.

Vaihe 3. Ympäristövaikutusten kvantifiointi

Seuraavaksi arvioidaan pitoisuuksien vaikutukset ihmisiin (eri tyyppinen oireilu ja eliniän lyheneminen) ja rakennettuun ympäristöön (rakennusmateriaalien korroosio ja likaantuminen) taajamissa. Haja-asutusalueilla arvioidaan terveysvaikutusten lisäksi luontovaikutuksia (sato- ja metsävauriot). Lisäksi arvioidaan hiilidioksidipäästöjen aiheuttaman ilmastomuutoksen haittoja.

Kaikkia ilmaan kohdistuvien päästöjen vaikutuksia ei ole voitu arvioida johtuen siitä, ettei käytettävissä ole riittävän luotettavia altistus-vaikutusfunktioita tai contingent valuation -menetelmällä tehtyjä referenssitutkimuksia. Arvottamatta jääneitä vaikutuksia ovat esimerkiksi vaikutukset vesistöihin, luonnon virkistysarvo, kulttuurihistorialliset arvot ja biodiversiteetti.

Tarkastelun ulkopuolella ovat rautatieliikenteen muut ympäristöhaitat, kuten melu ja haju, tilantarve, ajantarve, vaikutukset maisemaan, onnettomuudet, kuljetuskaluston elinkaaritarkastelut sekä ulkomaille kulkeutuvien päästöjen vaikutukset.

Pitoisuuksien ja vaikutusten välissä käsitellään nykyään yhä useimmin altistusta, ja alan tutkimus on vilkastunut viime vuosina huomattavasti. Altistuskäsitteen poisjättäminen voidaan tässä yhteydessä perustella sillä, että pääosa vaikutustutkimuksista perustuu mitattuihin pitoisuuksiin - ei altistuksiin - jolloin altistus on keskimäärin huomioitu pitoisuuden ja vaikutuksen välisessä suhteessa eli altistus-vaikutusfunktioissa.

Vaikutusten arviointi suoritetaan pääsääntöisesti EU:n rahoittamassa ExternE-projektissa suositeltujen altistus-vaikutusfunktioiden avulla (Euroopan komissio 1997a). Altistus-vaikutusfunktio kullekin erilaiselle vaikutukselle on muotoa:

muutos hyödykkeessä = korrelaatio • pitoisuus • altistuvan hyödykkeen/kohteen määrä

Tällöin esimerkiksi pienhiukkasten aiheuttama aikuisten astmaattikkojen lisääntynyt yskä arvioidaan seuraavasti:

$$\text{yskäpäivien määrä} = \text{korrelaatio} \cdot \text{PM}_{2.5}\text{-pitoisuus} \cdot \text{aikuisastmaattikkojen osuus väestöstä} \cdot \text{väestö}$$

Vaihe 4. Ympäristövaikutusten taloudellisen arvon määrittäminen

Arvioitaessa päästöjen haittavaikutusten taloudellista arvoa tavoitteena on muodostaa kansantaloudellinen kokonaisarvo. Tätä voidaan osittain mitata markkinahinnoilla ja osittain esimerkiksi contingent valuation -tutkimuksissa (CV) muodostettujen maksuhalukkuusarvioiden perusteella. Tässä selvityksessä käytetään markkinahintoja arvioitaessa materiaalien korroosion (huolto- ja vaihtokustannukset), metsävaurioiden (kantohinnat) ja satotappioiden (maataloustuotteiden maailmanmarkkinahinnat) kustannuksia arvioitaessa. Terveysvaikutusten, likaantumishaittojen sekä ilmastonmuutoksen kohdalla käytetään haittojen yksikköarvona joko CV-tutkimuksissa laadittuja yksikköarvoja tai markkinahintojen tai näiden yhdistelmiä.

Arviota Suomessa syntyvien ympäristökustannusten yksikköhaittoista ($\text{mk/kg}_{\text{päästö}}$) haja-asutusalueilla käytetään hyväksi arvioitaessa polttoaineketjujen alkupään eli käyttöä edeltävien vaiheiden ympäristökustannuksia.

Suomessa syntyvien päästöjen kulkeutumista Suomen rajojen ulkopuolelle, niiden vaikutuksia ja kustannuksia ei arvioida tässä selvityksessä. Mikäli näistä tehtäisiin arvio, olisi se mielekkäintä perustaa samoihin yksikköhaitta-arvioihin kuin arviot polttoaineketjujen alkupään haittoista eli haja-asutusalueille muodostettuihin yksikköhaittoihin. Ulkomailla syntyvät kustannukset saattavat muodostaa merkittävänkin osuuden päästöjen kokonaishaittoista, mutta haitta-arviota ei vielä tässä vaiheessa epävarmuuksien vuoksi ole katsottu mielekkääksi tehdä. Mikäli arvio tehtäisiin, sitä ei olisi syytä vallitsevalla tietotasolla laskea samanarvoisena arvioihin Suomessa syntyvistä haittakustannuksista, joista tehty arvio on huomattavasti luotettavampi.

Kaikki ympäristökustannukset esitetään vuoden 1997 rahassa.

1.3 Tulosten luotettavuus

Saatuihin arvioihin ympäristökustannuksista liittyy merkittävää epävarmuutta. Epävarmuudet liittyvät päästö- ja pitoisuusarvioihin, altistus-vaikutusfunktioihin, yksikkökustannuksiin ja laskentakorkoon. Luotettavia funktioita ei myöskään ole toistaiseksi läheskään kaikille altistus-vaikutusyhteyksille - esimerkiksi typpidioksidin terveysvaikutuksille. Erityisen merkittävä epävarmuuden lähde on ilmastonmuutoksen arvottaminen. Tässä selvityksessä arviot rautatieliikenteen päästöistä johtuvan ilmastonmuutoksen aiheuttamista kustannuksista perustuvat ExternE:ssä (Euroopan komissio 1997a ja 1997b) suositellun FUND-tietokonemallin (Institute for Environmental Studies, Amsterdam) tuottamiin tuloksiin. Alan tutkimuksen edetessä saattaa osoittautua, että "oikea" CO_2 -päästöjen yksikköarvo poikkeaa tässä käytetystä merkittävästikin.

Jatkossa tulosten tarkkuutta voisi dieseljunien aiheuttamien pitoisuusarvioiden osalta tarkentaa esimerkiksi joidenkin rataosuuksien leviämismallinnuksella ja/tai pitoisuusmittauksilla.

2. KATSAUS KANSAINVÄLISEEN TUTKIMUKSEEN

Viimeisen vuoden aikana on valmistunut useita tutkimuksia liikenteen päästöjen ympäristökustannuksista. Käytetyin menetelmä, erityisesti rautatieliikenteelle suoritetuissa tutkimuksissa, on ollut vaikutuspolkumenetelmä (impact pathway method), jota on kehitetty Euroopan Unionin rahoittaman ExternE-projektin eri vaiheissa. Viimeisimpiä tutkimuksia liikenteen päästöjen ympäristökustannuksista ovat:

- European Commission (1997): External Costs of Transport in ExternE. JOULE III Programme.
- European Commission (1998): Quality Indicators for Transport Systems (QUITS). TRANSPORT Programme.
- European Commission (1998): Pricing European Transport Systems (PETS). TRANSPORT Programme.
- European Commission (1998): Methodological Framework to evaluate Real Transport Costs (FISCUS Work Package 2). TRANSPORT RTD Programme. Käsikirjoitus.
- Statens Järnvägar (1996): Miljöredovisning.
- International Union of Railways, UIC (1998-1999): Environmental aspects of infrastructure (external environmental costs of transport)

Näitä tutkimuksia on kuvattu yksityiskohtaisemmin liitteessä II. Koska ympäristökustannukset ovat hyvin tapauskohtaisia ja riippuvaisia liikennemuodon lisäksi ajasta ja paikasta ei näissä projekteissa muodostettuja arvioita ole tarkoituksenmukaista siirtää suoraan Suomen olosuhteisiin. Sen sijaan yllä mainituissa tutkimuksissa esitellyt tutkimusmenetelmät ovat käyttökelpoisia arvioitaessa myös Suomen rautatieliikenteen polttoaineperäisten päästöjen aiheuttamia ympäristökustannuksia.

3. RAUTATIELIIKENTEEN PÄÄSTÖT

LIPASTO 96 on Suomessa kehitetty kaikkien liikennemuotojen pakokaasupäästöjen ja energiankulutuksen laskentajärjestelmä. Järjestelmän avulla laskettiin Suomen liikenteen hiilimonoksidi-, hiilivety-, typen oksidi-, hiukkas-, rikkidioksidi- ja hiilidioksidi-päästöt vuonna 1996. RAILI 96 on LIPASTO-järjestelmän alamalli, joka on kehitetty rautatieliikenteen päästöjen laskentaan. Kuten taulukko 3-1 osoittaa, ovat rautatieliikenteen päästöt kokonaisuutena ottaen pienet muihin liikennemuotoihin verrattuna. (Mäkelä ym. 1997).

Taulukko 3-1 Suomen liikenteen päästöt ja energiankulutus 1996 (ilmaliikenteen hiukkaspäästöt puuttuvat)

	Rikki- dioksidi t/a	Typen oksidit t/a	Hiukkaset t/a	Hiili- monoksidi t/a	Hiilivedyt t/a	Hiili- dioksidi 1000 t/a	Energian- kulutus TJ/a
Tieliikenne	1 175	127 037	7 557	295 514	49 012	10 301	141 061
Rautatieliikenne ¹	266	3 586	93	523	476	291	3 744
Vesiliikenne	19 619	62 513	1 702	14 214	5 145	2 534	34 936
Ilmaliikenne	271	2 495		2 774	317	728	9 789
Yhteensä	21 332	195 630	9 351	313 025	54 949	13 854	189 530
Rautatieliikenteen osuus	1,2 %	1,8 %	1,0 %	0,2 %	0,9 %	2,1 %	2,0 %

¹ Päästöt sisältävät sekä dieseljunaliikenteen päästöt että sähkönhankinnan päästöt.

3.1 Polttoaineperäiset päästöt

3.1.1 Käyttövaiheen päästöt

Dieselveturien päästöt riippuvat mm. käytetyn polttoaineen määrästä. VR Osakeyhtiön polttoaineen kulutus oli 53 600 tonnia vuonna 1996. Tästä VR Osakeyhtiön arvion mukaan 8 700 tonnia kului taajamissa ja 44 900 tonnia haja-asutusalueilla.

VR Osakeyhtiön linjaliikenneajosta on arvioitu 5 % tapahtuvan taajamissa. Tämä arvio perustuu toisaalta tietoon taajamien osuudesta Suomen pinta-alasta (2,5 %) ja toisaalta Ruotsissa tehtyyn vastaavaan arvioon, jossa osuudeksi arvioitiin myös 5 % (Statens Järnvägar 1996). Pinta-alaan perustuvaa arviota korjattiin hieman ylöspäin perustuen ratalinjauksiin.

Linjaliikenteen energiankulutuksen lisäksi tarkastellaan ratapihoilla tapahtuvan ns. vaihto- ja päivystystyön kuluttamaa polttoainetta. Näiden töiden vaatimista polttoainemääristä ei ole tehty varsinaisia tutkimuksia ja tässä jouduttiin tekemään VR Osakeyhtiön kokemukseen perustuva arvio, jota voidaan pitää suuruusluokaltaan kohtalaisen tarkkana. Vaihtotyön energiankulutuksesta kolmen viidesosan arvioitiin syntyvän taajamissa. Tämä arvio perustui käsitykseen ratapihatyöskentelyn luonteesta, suoritteista ja ratapihojen sijainnista.

Rataverkkoa on varsin vähän taajamissa, sillä rata kulkee yleensä taajamien läpi suora-
viivaisesti. Erillisiä kaupunkiratoja on vain pääkaupunkiseudulla. Näin ollen taajamaliikenteessä on ns. taajama-ajoa varsin vähän esimerkiksi tieliikenteeseen verrattuna.

Dieseljunaliikenteen päästöt on kohdistettu taajamille ja haja-asutusalueille edellä kuvattujen periaatteiden mukaisesti taulukossa 3-2.

Taulukko 3-2 Dieselveturien päästöt 1996, tonnia vuodessa

Komponentti	Taajamat	Haja-asutusalueet - t/a -	Yhteensä
SO ₂	14	74	88
NO _x	548	2 827	3 375
Dieselhiukkaset ¹	11	58	69
CO	74	384	458
Hiilivedyt	76	392	468
CO ₂	28 914	149 221	178 135

¹ Dieselveturien kaikki hiukkaspäästöt ovat kooltaan alle 2,5 µm eli PM_{2,5}.

3.1.2 Dieselin polttoaineketju

Polttoaineen käytön lisäksi päästöjä syntyy polttoaineketjun alkupään vaiheista, joita ovat polttoaineen tuotanto, kuljetukset, jalostus ja varastointi. Nykyisin suurin osa VR Osakeyhtiön käyttämästä dieselistä hankitaan Nesteeltä ja Venäjältä.

Polttoaineketjun alkupään päästöt arvioidaan pohjautuen SIHTI 2-selvitykseen Polttoaineketjujen paikalliset ympäristövaikutukset (Energia-Ekono ja Maa ja Vesi 1997). Polttoaineketjun päästöt voidaan arvioida päästökomponentteittain kullekin vaiheelle kyseisen vaiheen ominaispäästön ja dieselpolttonesteen lämpöarvon avulla. Dieselin lämpöarvo on 41,4 MJ/kg. Käytetyt ominaispäästökertoimet on koottu taulukkoon 3-3. Näiden avulla lasketut polttoaineketjun päästöt on koottu taulukkoon 3-4.

Polttoaineketjun ympäristökuormitukset eroavat öljylähteestä ja tuotantotavasta riippuen. Eroja on mm. Pohjanmereltä hankittavan ja länsimaissa jalostettavan tai Venäjältä tulevan polttoaineen välillä.

Öljyn tuotannossa (ml. öljyn etsintä) päästöjä aiheutuu poraus- ym. laitteistojen energiankulutuksesta. Tässä tarkasteltujen päästökomponenttien lisäksi öljynhankinnan ympäristökuormituksia aiheutuu mm. suurehkosta tuotantotoimintaan tarvittavasta maapinta-alan käytöstä sekä öljypäästöistä maaperään ja vesistöön.

Erityisesti venäläisessä tuotannossa vähäinen ympäristövaikutusten ja turvallisuuden huomioonottaminen vaadittavan infrastruktuurin rakentamisessa, tehottoman poraustekniikan käyttö, porausjätteiden ja jäteöljyn sekä muiden jätteiden puutteellinen käsittely sekä varastojen huono taso ovat lisänneet ympäristökuormituksia. Ongelmana ollut myös öljyn ohella syntyvän maakaasun soihduttaminen, mistä aiheutuu kasvihuonekaasuja ja hiukkaspäästöjä, joskin nykyisin kaasua pyritään myös hyödyntämään. Öljyput-

kionnettomuuksista aiheutuu paikallisesti terveysriskejä väestölle sekä vahinkoa luonnonympäristölle.

Taulukko 3-3 Dieselpolttoaineen polttoaineketjun alkupään eri vaiheiden ominaispäästöt, mg/MJ (Keiserås Bakkane 1994, Neste 1997, World Bank 1994)

Komponentti	Tuotanto	Kuljetus	Jalostus	Jakelu
- mg/MJ -				
SO ₂	0,5	0,1	11,5	0,4
NO _x	14,6	2,5	7,0	7,6
PM _{2,5}	0,7	0,0	0,9	0,4
CO	4,5	0,3	3,4	0,1
Hiilivedyt	38,5	8,3	2,2	0,1
CO ₂	1 684,1	184,3	3 553,7	133,3

Taulukon 3-3 mukaisesti suuri osuus öljyketjun päästöistä aiheutuu jalostusvaiheessa, mutta esimerkiksi haihtuvien hiilivetyjen kohdalla öljyn tuotantovaihe on merkittävin.

Koko polttoaineketjun päästöjä tarkasteltaessa (taulukko 3-4) tuotantovaiheessa, kotimaassa tai ulkomailla tapahtuvien päästöjen merkitys käyttövaiheen päästöihin verrattuna on vähäinen.

Taulukko 3-4 Dieselpolttoaineen polttoaineketjun alkupään sekä dieselveitureiden käytön päästöt, tonnia vuodessa

Komponentti	Polttoaineketjun alkupää			Käytön päästöt	Yhteensä ¹
	Päästöt	Päästöt	Yhteensä		
	ulkomailla	kotimaassa	- t/a -		
SO ₂	10	17,5	28	88	116
NO _x	43	27	70	3 375	3 445
PM _{2,5}	2	2	4	69	74
CO	13	5	18	458	477
Hiilivedyt	105	3	108	468	577
CO ₂	6 903	5 419	11 322	178 135	190 456

¹ Kaikkien rivien summat eivät täsmää, sillä lukuja on pyöristetty.

3.2 Sähköntuotannon päästöt

3.2.1 Sähköistysaste

Suomen rataverkon sähköistyksen suunnittelu alkoi vuonna 1955 ja ensimmäinen sähköistetty rataosuus valmistui vuonna 1969. Vuoden 1998 alussa sähköistettyä rataverk-

koa oli 2 198 km, mikä on 39 % pääratojen nykyisestä kokonaispituudesta. Vuonna 2000, kun lähes kaikki Etelä-Suomen tärkeimmät rataosat on sähköistetty tulee sähköistetyin rataverkon ratapituus olemaan 2 361 km, mikä on 42 % pääratojen nykyisestä kokonaispituudesta (Pussinen 1998). Tämän hetkinen rataverkko ja sen sähköistetyt osuudet on esitetty liitteessä I.

Vaikka rataverkosta alle puolet on sähköistetty, suurin osa eli noin 80 % henkilöliikenteen junakilometreistä liikennöidään sähkövetoisella kalustolla ja tavaraliikenteenkin junakilometreistä noin puolet. Kaikista junakilometreistä vuonna sähkövedon osuus vuonna 1996 oli 66,6 %. Nykyisten sähköistystöiden valmistuttua sähkövedon osuus nousee jo 70 %:in. (Pussinen 1998)

3.2.2 Sähkön tuotantovaiheen päästöt

Rautateiden käyttämä sähkö oletetaan tässä selvityksessä tuotetuksi Suomen keskimääräisellä tuotantorakenteella. Huomioon otetaan myös se, että osa käytetystä sähköstä on tuotu Ruotsista, Norjasta ja Venäjältä. Tällöin yhteenlaskettu kotimainen tuotanto sekä tuonti vastaavat keskimäärin käytettyä sähköä. Taulukossa 3-5 on esitetty Suomen sähköntuotannon rakenne ja tuonti vuonna 1995 (Tilastokeskus 1996). Sähkön hankinnan päästöarviot perustuvat Tilastokeskuksen (1996) raportoiimiin energiantuotannon kokonaispäästöihin polttoaineittain. Näistä kokonaispäästöistä sähköntuotannon päästöt on eritelty perustuen Energia-Ekonon käyttämän kattilatieokannan tietoihin. Tämä tietokanta kattaa 99 % Suomen yli 1 MW kokoisista voimalaitoksista. Taulukossa on arvioitu myös tuontisähkön päästöt.

Taulukko 3-5 Suomen sähköntuotanto ja -tuonti polttoaineittain sekä sähköntuotannon päästöt vuonna 1995

Polttoaine	Sähkön tuotanto - TWh/a -	Päästöt - 1000 t/a -				
		SO ₂	NO ₂	Hiukkaset	CO	CO ₂
Ydinvoima	18,1	-	-	-	-	-
Vesivoima	12,8	-	-	-	-	-
Kivihiili	10,0	13	12	1,2	9	6 450
Maakaasu	6,3	-	3,8	-	1	2 250
Öljy	1,4	1	0,6	0,1	0,1	400
Kotimaiset polttoaineet ¹	12,0	5	7	5,1	15	5 500
Yhteensä	60,6	19	23	6,4	25	14 600
Nettotuonti ²	8,4	1	2	0,4	2	1 000
Yhteensä	69,0	20	25	6,8	27	15 600

¹ Kotimaiset polttoaineet sisältävät turpeen, puun ja lipeän.

² Tuontisähkön päästöt on Ruotsin (51 %) ja Norjan (1 %) osalta oletettu nolllaksi, sillä sähkö on tuotettu pääosin vesivoimalla. Venäjän (48 %) osalta tuotannon päästöjen on oletettu vastaavan Suomen keskimääräisiä päästöjä.

Ydinvoiman, vesivoiman ja Ruotsista sekä Norjasta tuodun pääosin vesivoimalla tuotetun sähkön osuus sähkön kokonaishankinnasta on 35,3 TWh eli 51 %. Aiemmin tehtyjä fossiilisten ja biopolttoaineiden käyttöön perustuvia arvioita sähköntuotannon haitoista voidaan korjata alaspäin tällä prosentilla.

VR Osakeyhtiön liikennöinnin sähkön kulutus oli 422 GWh vuonna 1996. Samana vuonna rataverkkoon kuuluvien vaihteiden lämmitys, turvalaitteet, tasoristeysten turvalaitteet sekä ratapihojen valaistus kuluttivat 65 GWh. Näiden infrastruktuuritoimintojen kulutus jaetaan diesel- ja sähköjunaliikenteelle suhteessa junakilometreihin. Vuonna 1996 junakilometreistä 33,4 % syntyi dieseljunaliikenteessä ja 66,6 % sähköjunaliikenteessä (Pussinen 1998), joten vastaavasti infrastruktuuritoimintojen sähkönkäytöstä voidaan kohdistaa 22 GWh dieseljunaliikenteelle ja 43 GWh sähköjunaliikenteelle.

Yhteensä kulutus oli siis 487 GWh. Suomen sähköverkkojen häviöt olivat 4,3 % vuonna 1995. Koska VR ostaa sähkön suurjännitteellä, sille kohdistettava osuus häviöistä arvioidaan siirtoverkkojen häviöiden mukaisesti, jotka ovat 1 - 2 %. Täten sähkön käytön haittoja pitää korjata hieman ylöspäin. Kertoimena käytetään 1,5 %, jolloin vuoden 1996 kokonaiskulutusta (487 GW) vastaava sähkön hankinta oli yhteensä 494 GWh.

Taulukossa 3-6 on esitetty junaliikenteen vuonna 1996 tarvitseman sähkön hankinnan päästöt. Liikennöinnin päästöt on esitetty RAILI:n mukaan. Sähkö- ja dieselvetoisen liikenteen tarvitseman infrastruktuurin sähkön käytön sekä siirtohäviöiden aiheuttamat päästöt on arvioitu niiden sähkönkulutuksen suhteessa liikennöinnin sähkönkulutukseen. Esitettyjä sähkönhankinnan päästöjä ei käytetä jatkotarkasteluissa, sillä sähkön käytön yksikköhaitta on otettu käytetystä lähdeseelvityksessä muodossa p/kWh, jota voidaan soveltaa kulutukseen edellä kuvatuin periaattein.

Taulukko 3-6 Rautatieliikenteen tarvitseman sähkön hankinnan päästöt vuonna 1996, tonnia vuodessa

Päästökomponentti	Liikennöinti, sähköjunat (422 GWh)	Infra-toiminnot (65 GWh)	Häviöt (1,5 %) (7 GWh)	Yhteensä
		- t/a -		
SO ₂	179	27	3	209
NO _x	211	32	4	247
Hiukkaset	24	4	0,4	28
CO	64	10	1	75
Hiilivedyt	8,4	1,3	0,14	9,8
CO ₂	112 519	17 331	1 866	131 716

3.2.3 Sähkönhankinnan polttoaineketjut

Sähkön tuotannon päästöjen lisäksi huomioon on otettava sähkön tuotannossa käytettyjen polttoaineiden polttoaineketjujen alkupään päästöt, jolloin saadaan sähköntuotannon koko elinkaaren aikaiset päästöt. Polttoaineketjun alkupää käsittää fossiilisten ja bio-

polttoaineiden tuotannon, kuljetukset, varastoinnin ja jakelun sekä kotimaassa että ulkomailla. Tarkasteltavia polttoaineita ovat kivihiili, maakaasu, polttoöljyt, turve, kuori ja lipeä.

Tutkimuksessa *Tuulivoiman ja aurinkosähkön kilpailukyky ympäristöhyödyt huomioon ottaen* (Energia-Ekono 1998a) arvioitiin myös Suomen energiantuotannon polttoaineketjujen alkupään päästöt vuonna 1995. Tutkimuksessa esitetyt arviot pohjautuivat SIHTI-ohjelman selvityksiin *Polttoaineiden paikalliset ympäristövaikutukset* (Energia-Ekono ja Maa ja Vesi 1997) sekä *Polttoaineiden tuotanto- ja käyttöketjujen ympäristöpäästöt* (Energia-Ekono 1993). Kyseisissä projekteissa selvitettiin polttoaineketjujen eri vaiheiden ominaispäästöt (mg/MJ polttoainetta). Tässä selvityksessä tuotantorakenne on erilainen sisältäen fossiilisten ja biopolttoaineiden lisäksi vesi- ja ydinvoiman sekä sähkön tuonnin.

Taulukossa 3-7 on esitetty, miten rautatieliikenteen käyttämän sähkön polttoaineketjujen alkupään yhteenlaskettu ominaispäästö (E) muodostuu. Ensimmäisessä sarakkeessa (A) on esitetty kaikkien Suomen sähköntuotannossa käytettävien eri primaarienergialähteiden polttoaineketjujen alkupään päästöt vuonna 1995 (Energia-Ekono 1998a ja 1993 sekä Energia-Ekono ja Maa ja Vesi 1997). Toisessa sarakkeessa (B) on näistä päästöistä lasketut Suomen oman sähköntuotannon (60,6 TWh) polttoaineketjujen alkupään ominaispäästöt. Seuraavassa sarakkeessa (C) on esitetty tuontisähkön eli lähinnä Venäjällä tuotetun sähkön (8,4 TWh:n kokonaistuonnista 4,0 TWh) tuotantovaiheen päästöt. Sarakkeessa (D) on laskettu yhteen Suomen oman sähköntuotannon polttoaineketjujen alkupään päästöt (A), Venäjällä tuotetun sähkön tuotantovaiheen päästöt (C) sekä näitä vastaavat polttoaineketjujen alkupään päästöt sarakkeen B ominaispäästökertoimia käyttäen. Viimeisessä sarakkeessa (E) on laskettu sarakkeessa D esitetyistä kokonaispäästöistä polttoaineketjujen alkupään ja sähkön tuonnin ominaispäästöt, jotka vastaavat 69,0 TWh kokonaishankintaa.

Taulukko 3-7 Sähkönhankinnan polttoaineketjujen alkupään ominaispäästöt, g/kWh

Komponentti	Suomen sähkön- tuotannon pa- ketjujen alku- pään päästöt - 1000 t/a - (A)	Ominais- päästöt - g/kWh - (B)	Tuontisähkön päästöt - 1000 t/a - (C)	Polttoaineketju- jen alkupään päästöt yhteensä - 1000 t/a - (D)	Pa-ketjujen al- kupään ominais- päästöt yhteensä - g/kWh - (E)
SO ₂	1,4	0,02	1,4	2,7	0,04
NO ₂	5,8	0,10	1,9	8,0	0,11
Hiukkaset (PM ₁₀)	0,8	0,01	0,5	1,3	0,02
TSP	15	0,25	1,0	16	0,24
CO	6,7	0,11	2,2	9,0	0,13
Hiilivedyt (CH ₄ ja NMVOC)	30	0,50	2,3	33	0,47
CO ₂	860	14	1 030	1 900	27

Näitä ominaispäästökertoimia (sarake E) hyväksi käyttäen arvioidut polttoaineketjun alkupään päästöt on koottu taulukkoon 3-8. Päästöt on eritelty erikseen liikennöinnin ja infrastruktuurin sähkönkäytölle sekä häviöille. Infrastruktuurin sähkönkäyttö sisältää

sekä diesel- että sähkövetoisen liikenteen tarvitseman infrastruktuurin kulutuksen. Häviöt sisältävät sekä liikennöinnin että infrastruktuurin sähkön hankintaan liittyvät siirtohäviöt.

Taulukko 3-8 Sähköntuotannon polttoaineketjujen alkupään päästöt eri kulutuskoh- teiden sähkönkäytölle eriteltynä, tonnia vuodessa

Komponentti	Liikennöinnin sähkönhankintaa vastaavat	Infrastruktuurin sähkönhankintaa vastaavat	Häviöitä vastaavat	Sähkönhankinnan polttoaineketjujen alku- pään päästöt yhteensä
- t/a -				
SO ₂	17	2,6	0,3	20
NO _x	48	7,3	0,8	56
PM _{2,5}	8	1,2	0,1	9
TSP	99	15	1,7	116
CO	54	8,3	0,9	63
Hiilivedyt ¹	200	31	3,3	234
CO ₂	11 518	1 774	191	13 484

¹ Luku on suuri, sillä se sisältää Venäjältä tuotavan maakaasun (CH₄) tuotannon ja siirron häviöt.

3.3 Rautatieliikenteen päästöt yhteensä

Taulukossa 3-9 on esitetty rautatieliikenteen päästöt yhteensä. Sähkön hankinnan polttoaineketjun alkupään päästöt on laskettu koko sähkönkäytölle 494 GWh (ks. taulukko 3-8). Edellä arvioitiin dieselvetoisen junaliikenteen tarvitseman infrastruktuurin sähkönkäytön olevan 22 GWh ja sähkövetoisen junaliikenteen 43 GWh.

Taulukko 3-9 Rautatieliikenteen päästöt yhteensä vuonna 1996, tonnia vuodessa

Kompo- nentti	Polttoaineketjujen alkupää		Liikennöinti		Infrastruk- tuurin sähkö	Sähkö- häviöt	Yhteensä
	Diesel	Sähkö	Diesel	Sähkö			
	- t/a -						
SO ₂	28	20	88	179	27	3	344
NO _x	70	56	3 375	211	32	4	3 748
PM _{2,5}	4	9	69	24	4	0,4	111
TSP	0	116	0	0	0	0	116
CO	18	63	458	64	10	1	615
Hiilivedyt	108	234	468	8,4	1,3	0,14	820
CO ₂	11 322	13 484	178 135	112 519	17 331	1 866	335 657

3.4 Resuspensio

Resuspensiolla tarkoitetaan maasta ilmaan kohoavia hiukkasia. Resuspensiota (tai re-emissiota) aiheuttavat mm. autoliikenne sekä voimakas tuuli. On arvioitavissa, että myös junien turbulenssi aiheuttaa resuspensiota lähinnä ratapihoilla ja ratapenkköjen lähistöillä. Resuspensio on Suomen taajamissa keskeisin hiukkasten massapitoisuuksiin

vaikuttava tekijä, ja ilmiötä pidetään merkittävänä ilmansuojeluongelmana. Hiukkasille asetetut ilmanlaadun ohjearvot ylittyvät useissa taajamissa. Korkeita pitoisuuksia mitataan erityisesti keväisin, kun lumi sulaa ja tiet sekä maanpinta kuivuvat jolloin hiukkaset kohoavat helposti ilmaan.

Ilmiö aiheutuu pitkälti hiekoitushiekasta samoin kuin mm. asfalttia kuluttavien nastarenkaiden käytöstä. Usein puhutaankin katupölystä. Myös aiemmin ilmaan kohonnut materiaali, suorista päästöistä peräisin olevat hiukkaset ja kauempaa kulkeutuvat hiukkaset laskeutuvat maahan resuspendoituakseen uudelleen. Tällöin rautatieliikenne voi taajamissa osaltaan aiheuttaa jonkin verran esimerkiksi katupölyperäisiä hiukkaspitoisuuksia. Tutkimustuloksia rautatieliikenteen aiheuttamasta resuspensiosta ei kuitenkaan toistaiseksi ole käytettävissä.

Muut keskeiset hiukkaspitoisuuksiin vaikuttavat tekijät ovat liikenteen, energiantuotannon ja teollisuuden suorat hiukkaspäästöt, kaasumaisista yhdisteistä ilmakehässä vähitellen muodostuvat hiukkaset, kaukokulkeuma sekä luontoperäiset hiukkaset.

Kokonaisleijumaa eli TSP-pitoisuuksia on mitattu säännöllisesti jo 1970-luvun loppupuolelta lähtien, ja pitoisuuksien tärkeimmäksi lähteeksi on selvityksissä osoitettu nimienomaan resuspensio. Esimerkiksi pääkaupunkiseudulla noin 90 % TSP-pitoisuuksista arvioitiin aiheutuvan resuspensiosta 1980-luvun loppupuolella (Laukkanen 1990).

Kooltaan pienempien, ns. hengitettävien eli PM_{10} -hiukkasten pitoisuuksia on seurattu Suomessa säännöllisesti 1980-luvun loppupuolelta lähtien. Selvitykset ovat osoittaneet, että resuspensiolla on keskeistä vaikutusta myös PM_{10} -pitoisuuksiin. Taajamien hengitettävistä hiukkasista aiheutuu suuruusluokaltaan noin 30-50 prosenttia resuspensiosta (esim. Hosiokangas 1995, Ojanen ym. 1998).

Hiukkasongelmaa on torjuttu jo vuosia mm. katujen puhtaanapitoa kehittämällä. Myös suoria päästöjä on vähennetty eri lähteistä. TSP- eli kokonaisleijumapitoisuuksia onkin saatu alennettua. Sen sijaan PM_{10} -pitoisuuksiin toimenpiteet eivät tunnu vaikuttavan yhtä tehokkaasti.

Tässä työssä junaliikenteen aiheuttama resuspensio on arvioitu erittäin suuntaantavasti. Toisaalta vaikutuksen on oletettu ulottuvan vain noin sadan metrin etäisyydelle rataverkosta. Jatkossa junien aiheuttamia hiukkaspitoisuuksia olisi perusteltua selvittää lyhytaikaisilla mittauksilla.

4. RAUTATIELIIKENTEEN AIHEUTTAMAT PITOISUUDET

Ympäristökustannusten arvioimisen keskeisiä lähtötietoja ovat rautatieliikenteen aiheuttamat pitoisuudet. Työssä on arvioitu dieseljunien päästöjen aiheuttamat pitoisuudet. Lisäksi on huomioitu sähköjunien käyttämän sähköön tuotannon aiheuttamat päästöt ja edelleen niistä aiheutuvat pitoisuudet, jotka on arvioitu aiemmassa selvityksessä (Energia-Ekono Oy 1998a). Tutkimusta on referoitu lyhyesti kappaleessa 4.2.

4.1 Dieseljunaliikenteen aiheuttamat pitoisuudet

Dieseljunien aiheuttamat dieselhiukkas-, sulfaatti-, nitraatti, kokonaisleijuma eli TSP-, rikkidioksidi, hiilimonoksidi- ja otsonipitoisuudet on arvioitu tässä yhteydessä. Hiilimonoksidille on arvioitu suurin tuntipitoisuus, otsonille 6-tunnin keskiarvo ja muille vuosikeskiarvo. Päästökomponenttien ja aikajaksojen valinta perustuu käytettävissä oleviin altistus-vaikutusfunktioihin. Pitoisuudet on arvioitu erikseen taajamissa ja haja-asutusalueilla.

Dieseljunien aiheuttamaa typen oksidien pitoisuutta ei ole huomioitu tässä työssä, koska haittojen - esimerkiksi terveysvaikutusten - arviointiin tarvittavia ja riittävän luotettavia altistus-vaikutusfunktioita ei toistaiseksi ole käytettävissä. Hiilivedyistä mm. bentseenille, bentso[a]pyreenille ja 1,3-butadieenille on olemassa syöpäriskiä arvioivia altistus-vaikutusfunktioita, mutta dieseljunaliikenteen osuuden arvioiminen näiden aineiden alhaisista kokonaispitoisuuksista on nykyisellään lähes mahdotonta mittausaineiston vähäisyyden vuoksi.

Tieliikenteen aiheuttamat pitoisuudet tunnetaan Suomessa kohtuullisen hyvin. Dieseljunien ilmanlaatuvaikutuksia ei ole juurikaan selvitetty Suomessa. Turun ilmanlaatuselvityksen yhteydessä on myös junaliikenteen aiheuttamia pitoisuuksia mallinnettu (Pietarila ym. 1997). Kuopiossa on mitattu dieseljunien aiheuttamia pitoisuuksia ratapihalla, ja nämä tulokset saataneen käyttöön lähitulevaisuudessa. Dieseljunaliikenteen aiheuttamat pitoisuudet on tässä työssä arvioitu suhteuttamalla dieseljunien päästöt tieliikenteen päästöihin.

Päästöt sekä tie- että dieseljunaliikenteestä tunnetaan varsin hyvin. Päästötietojen avulla tehtävissä pitoisuusarvioissa on lukuisia epävarmuuksia, mutta työn puitteissa ei ole ollut mahdollista käyttää muita menetelmiä - esimerkiksi mallinnusta tai pitoisuuksien mittaamista rataosuuksien lähistöllä. Voidaan kuitenkin olettaa, että rautatie- ja tieliikenteen päästöjen leviäminen ja ilmakemiallinen muutunta ovat varsin samanlaisia. Tällöin pitoisuuksien arvioimisen päästömääriä suhteuttamalla voidaan katsoa tuottavan varsin luotettavia tuloksia. Arviot tulevat tarkentumaan tulevaisuudessa kun uutta aineistoa mm. hiukkaspitoisuuksista ja niiden koostumuksesta saadaan käyttöön.

Suomessa tehtyjen pitoisuusmittausten, leviämislaskelmien ja muiden selvitysten perustella on tässä työssä arvioitu kullekin tarkastellulle komponentille keskimääräinen kotimaisen tieliikenteen aiheuttama pitoisuus sekä taajamiin että haja-asutusalueille eri lähteitä hyödyntäen (Saari ym. 1996, Ilmatieteen laitos 1997 ja 1998, Pesonen ym. 1996, Aarnio ym. 1998, Ojanen ym. 1998, Karppinen ym. 1995, Hiltunen ym. 1993, Lindfors ym. 1995, Pietarila ym. 1997b, 1997c). Lisäksi on käytetty Turun ilmanlaa-

tuselvitystä, jossa myös dieseljunaliikenteen päästöjen aiheuttamia pitoisuuksia on mallinnettu (Pietarila 1997a).

Paikallisesti ratapihoilla junaliikenne voi aiheuttaa huomattavasti nyt arvioituja keskimääräisiä pitoisuuksia korkeampia tasoja. Turussa dieseljunaliikenne aiheuttaa mallilaskelmien mukaan esimerkiksi maksimissaan $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$:n rikkidioksidin vuosikeskiarvon (Pietarila 1997a). Samoin junaliikenne voi aiheuttaa paikallisesti huomattavia typen oksidien pitoisuuksia.

Aiempaan tieliikenteen arvottamisselvitykseen verrattuna (Tielaitos 1997) nyt käytetyt tieliikenteen aiheuttamat pitoisuudet ovat samaa tasoa; lähinnä rikkidioksidi- ja sulfaatipitoisuudet ovat tarkentuneet alaspäin.

Päästötiedot pohjautuvat LIISA- ja RAILI-järjestelmiin (Mäkelä 1997 ja Mäkelä ym. 1998). Ilmakehässä pääosin muodostuvien sulfaatin ja nitraatin sekä otsonin kohdalla suhde on laskettu yhteenlasketuista taajamien ja haja-asutusalueiden päästöistä. Muiden komponenttien osalta päästösuhde on nyt arvioitu erikseen taajamiin ja haja-asutusalueille.

Seuraavaan taulukkoon 4-1 on koottu arviot dieseljunaliikenteen aiheuttamista päästöistä ja pitoisuuksista sekä arvioinnissa käytetyt koko liikennesektorin päästö- ja pitoisuusarviot. Taulukon jälkeen on kuvaus siitä, miten arviot on kullekin päästökomponentille suoritettu.

Taulukko 4-1 Dieseljunaliikenteen aiheuttamat päästöt (t/a) ja pitoisuudet ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) vuonna 1996. Pitoisuudet ovat vuosikeskiarvoja hiilimonoksidia ja otsonia lukuunottamatta.

	Päästöt, t/a				Pitoisuudet, $\mu\text{g}/\text{m}^3$			
	Dieseljunat		Autoliikenne		Autoliikenne		Dieseljunat	
	T ¹	H ²	T	H	T	H	T	H
Dieselhiuk. (PM _{2,5})	11	58	3 785	3 771	2,50	0,25	0,007	0,004
Sulfaatti	14	74	603	573	0,03	0,02	0,002	0,001
Nitraatti	548	2 827	56 928	70 109	0,60	0,20	0,016	0,005
TSP yhteensä					-	-	0,685	0,176
CO ₂	28 914	149 221	5 305 348	4 995 442	-	-	-	-
CO, 1-h	74	384	201 601	93 914	9,50	0,50	0,003	0,002
Hiilivedyt	76	392	32 008	17 004	-	-	-	-
O ₃ , 6-h	548	2 827	56 928	70 109	-	7,50	-	0,199
SO ₂	14	74	603	573	0,50	0,05	0,012	0,006

¹ T = Taajamat ² H = Haja-asutusalueet

Dieseljunien aiheuttamat pitoisuudet on arvioitu päästöjen suhteessa tieliikenteen aiheuttamiin pitoisuuksiin. Tästä aiheutuu pientä epävarmuutta, sillä kyseessä on erikorkuiset päästölähteet ja rautateiden sijainti poikkeaa jonkin verran tieverkosta. Koska vaikutuksia ei kuitenkaan arvioida teiden tai rautateiden välittömässä läheisyydessä, vaan laajoilla maantieteellisillä alueilla, ei valitusta tarkastelutavasta syntyvä epävarmuus ole kuitenkaan kovin suuri. Altistus-vaikutusfunktiot, joilla vaikutusten arviointi suoritetaan, eivät ota erikseen huomioon esimerkiksi ihmisten tilapäistä oleskelua korkeissa pitoisuuksissa teiden varsilla vaan ne on laadittu keskimääräisen vuotuisen altistumisen mukaan.

Dieselhiukkaset

Dieselliikenteestä aiheutuu tyypillisesti melko korkeat suorat hiukkaspäästöt. Päästöt sisältävät mm. nokea ja erilaisia hiilivetyjä. Tieliikenteen suorien hiukkaspäästöjen aiheuttamiksi pitoisuuksiksi on taajamissa keskimäärin arvioitu 2,5 ja maaseudulla 0,25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Dieseljunien aiheuttamaksi pitoisuudeksi tulee taajamissa 0,007 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ja haja-asutusalueella 0,004 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ päästösuhteiden avulla arvioituna.

Sulfaatti

Sulfaatti muodostuu ilmakehässä vähitellen rikkidioksidista. Sulfaattia myös kaukokulkeutuu tehokkaasti, jolloin kaukokulkeumalla on huomattavaa vaikutusta Suomessa havaittaviin pitoisuuksiin. Tieliikenteellä on vähäinen vaikutus sulfaattipitoisuuksiin ja sen aiheuttamaksi keskimääräiseksi pitoisuudeksi on taajamissa arvioitu 0,03 ja 0,02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ haja-asutusalueilla. Rikkidioksidipäästöjen suhteella arvioiden dieseljunaliikenteen aiheuttamiksi pitoisuuksiksi saadaan vastaavasti 0,002 ja 0,001 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Nitraatti

Nitraatti muodostuu ilmakehässä vähitellen typpiyhdisteistä, ja nitraattia myös kaukokulkeutuu. Tieliikenteen aiheuttamaksi keskimääräiseksi nitraattipitoisuudeksi on taajamissa arvioitu 0,60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ja haja-asutusalueilla 0,20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Typen oksidien päästöjen suhteella arvioiden dieseljunat aiheuttavat taajamissa pitoisuuden 0,016 ja maaseudulla 0,005 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Kokonaisleijuma (TSP)

Kokonaisleijumalla tarkoitetaan kaikkia ilmassa olevia hiukkasia. Pitoisuudet ovat Suomessa suhteellisen korkeita, ja ohjearvot ylittyvät taajamissa melko yleisesti. Pitoisuudet aiheutuvat kuitenkin pääosin tieliikenteen aiheuttamasta ns. resuspensiosta: teille kerääntynyt materiaali - jauhautunut hiekoitushiekka, kulunut asfaltti yms. - kohoo ilmaan liikenteen aiheuttaman turbulenssin takia. Suorien päästöjen ja ilmakehässä päästöistä muodostuneiden hiukkasten aiheuttama osuus kokonaisleijumasta on pieni. Terveysvaikutuksiltaan tällaiset hiukkaset ovat todennäköisesti kuitenkin haitallisempia resuspensiosta peräisin oleviin hiukkasiin verrattuna.

Dieseljunien aiheuttamat kokonaisleijumapitoisuudet muodostuvat suorista päästöistä, ilmakehässä, kaasumaisista epäpuhtauksista muodostuvista hiukkasista sekä resuspensiosta. Resuspensiosta ei ole kvalitatiivisia arvioita käytettävissä, mutta resuspensio lisääntyy liikennesuoritteiden funktiona (mm. Laukkanen ja Jouttijärvi 1990). Suuntaantavasti on tässä yhteydessä arvioitu, että koko rautatieliikenteen resuspensio (diesel- ja sähköjunaliikenne yhteensä) aiheuttaisi suuruusluokaltaan 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pitoisuuden taajamissa ja 0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ haja-asutusalueilla. Suorien päästöjen, sulfaatin ja nitraatin vaikutus hiukkaspitoisuuksiin on noin 0,025 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ taajamissa ja noin 0,011 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ haja-asutusalueella. Kun vielä huomioidaan, että dieseljunien liikennesuorite on 33 % rautatieliikenteen kokonaisliikennesuoritteesta, saadaan dieseljunien aiheuttamaksi TSP-pitoisuudeksi taajamissa 0,70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ja haja-asutusalueelle 0,20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

TSP muodostuu pääosin ns. suurista hiukkasista, jotka laskeutuvat melko nopeasti. Kokonaisleijumapitoisuus pieneneekin hyvin nopeasti etäisyyden kasvaessa lähdealueelta.

Tämä on otettu huomioon vaikutuslaskelmissa: on oletettu että vain osa väestöstä altistuu rautatieliikenteen aiheuttamille TSP-pitoisuuksille (ks. kappale 5.1.4).

Hiukkasten pitoisuusarvio on hyvin suuntaa-antava. Arviota olisikin perusteltua tarkentaa esimerkiksi lyhytaikaisilla mittauksilla.

Rikkidioksidi

Rikkidioksidipitoisuudet ovat nykyään varsin alhaisia Suomessa ja ovat peräisin pääosin energiantuotannosta sekä kaukokulkeumasta. Tieliikenteen aiheuttamaksi vuosikeskiarvoksi on arvioitu taajamissa suuruusluokka $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja haja-asutusalueilla $0,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Tällöin päästösuhteen avulla arvioituna rautatieliikenteen aiheuttamaksi pitoisuudeksi tulee taajamissa $0,012$ ja $0,006 \mu\text{g}/\text{m}^3$ haja-asutusalueilla.

Hiilimonoksidi

Hiilimonoksidi- eli häkäpitoisuudet ovat myös melko alhaisia Suomessa katalysaattoreiden ja reformuloitujen polttoaineiden ansioista. Pitoisuudet aiheutuvat miltei kokonaan bensiinikäyttöisten henkilöautojen päästöistä. Tieliikenteen aiheuttamaksi keskimääräiseksi maksimituntikeskiarvoksi on arvioitu taajamissa $9,5 \text{ mg}/\text{m}^3$ ja haja-asutusalueilla $0,5 \text{ mg}/\text{m}^3$. Päästösuhteen avulla arvioituna junien aiheuttamaksi pitoisuudeksi tulee taajamissa $0,003 \text{ mg}/\text{m}^3$ ja haja-asutusalueella $0,002 \text{ mg}/\text{m}^3$.

Otsoni

Otsonia ei ole päästöissä vaan se muodostuu alailmakehässä vähitellen lähinnä typen oksidin ja hiilivetyjen reagoidessa auringon valossa. Otsonin käyttäytyminen ilmakehässä on varsin monimutkaista. Pohjois-Euroopan olosuhteissa alailmakehän otsoni on ns. taustailmanlaadun ongelma; taajamissa otsoni reagoi herkästi aluksi muiden epäpuhtauksien kanssa, jolloin pitoisuudet ovat maaseutua alhaisempia.

Otsonin muodostus muista epäpuhtauksista tapahtuu vasta kymmenien tai satojen kilometrien etäisyydellä päästölähteistä. Keski-Euroopasta tulevalle kaukokulkeumalla on huomattava vaikutus Suomessa havaittaviin pitoisuuksiin, etenkin keväällä ja kesällä havaittaviin lyhytaikaisesti kohonneisiin pitoisuuksiin. Nykykäsityksen mukaan myös keskimääräinen otsonitaso koko pohjoisella pallonpuoliskolla olisi kohonnut tämän vuosisadan aikana noin kaksinkertaiseksi.

Suomen päästöjen vaikutusta vallitseviin otsonipitoisuuksiin on kvantitatiivisesti erittäin vaikea arvioida mm. monimutkaisen ilmakemian ja Keski-Euroopasta tulevan kaukokulkeuman vaikutuksen takia. Mallitustulosten avulla voidaan kuitenkin suuntaa-antavasti arvioida Suomen omien päästöjen aiheuttavan suuruusluokaltaan $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pitoisuuslisän päiväpitoisuuksiin Lindforsin ym. (1995) tulosten pohjalta. Typen oksidit ovat keskeisin otsoninmuodostukseen vaikuttava yhdiste Suomessa. Kun noin 50 % päästöistä tulee liikenteestä, tieliikenteen aiheuttamaksi pitoisuudeksi haja-asutusalueilla voidaan arvioida $7,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja edelleen dieseljunaliikenteen osuudeksi voidaan arvioida $0,20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ typen oksidien päästösuhteiden avulla. Taajamiin pitoisuutta ei voida arvioida.

4.2 Sähköjunaliikenteen sähkönhankinnan aiheuttamat pitoisuudet

Tässä projektissa ei ole erikseen arvioitu rautatieliikenteen vaatiman sähköntuotannon aiheuttamia pitoisuuksia. Arvioita ei ole tarvittu, sillä käyttöön on otettu aiemmin arvioidut fossiilisiin- ja biopolttoaineisiin perustuvan sähköntuotannon aiheuttamat yksikköhaitat, jotka on käytettävissä sekä muodossa markkoja päästötonnia kohden erilaisille epäpuhtauksille sekä tuotettua kilowattituntia kohden. Nämä yksikköhaitat arvioitiin tutkimuksessa Tuulivoiman ja aurinkosähkön kilpailukyky ympäristöhyödyt huomioon ottaen (Energia-Ekono Oy 1998a). Muodostetut yksikköhaitat korjataan tässä selvityksessä vastaamaan sähkön myyntiä/käyttöä ottamalla huomioon ydin- ja vesivoiman tuotannon sekä sähkön tuonnin. Tämä tarkastelu suoritetaan luvussa 5.2.1.

Haitta-arviot perustuivat vuoden 1995 päästöihin ja pitoisuuksiin, jotka arvioitiin vuoden 1997 loppupuolella käytettävissä oleviin tietoihin perustuen. Tehdyt pitoisuusarviot tarkastettiin tämän työn aikana eikä merkittäviä uusia tietoja arvioiden tarkistamiseksi ole käytettävissä. Suurimmat epävarmuudet liittyvät sähköntuotannon päästöjen aiheuttaman otsoninmuodostukseen, jota ei ollut mahdollista mallintaa. Arvio energiasektorin osuudesta otsonin muodostumisessa suoritettiin suhteuttamalla energiantuotannon typen oksidi- ja VOC-päästöjen määrä muista lähteistä syntyviin päästöihin kaukokulkeuma huomioiden. Otsonin luontoon kohdistuvien vaikutusten kustannukset arvioitiin kuitenkin hyvin pieneksi tekijäksi kokonaishaitoista. Merkittävämpi epävarmuuden lähde pitoisuusarvioissa oli hiukkaspitoisuudet taajamissa, sillä terveysvaikutukset olivat ilmastomuutoksen ohella toinen lopputulosten suuruusluokassa määräävä tekijä.

5. ARVOTTAMINEN

5.1 Dieseljunaliikenteen aiheuttamat ympäristökustannukset

Luvuissa 5.1.1 - 5.1.9 arvioidaan dieseljunaliikenteen aiheuttamia ympäristökustannuksia. Arvioissa ovat mukana terveysvaikutukset (kuolleisuus- ja sairastuvuusriski), vaikutukset rakennettuun ympäristöön (rakennusmateriaalien syöpyminen eli korroosio sekä likaantuminen), vaikutukset luontoon (metsiin ja satoihin) sekä ilmastonmuutoksen vaikutukset. Vaikutuksista esimerkiksi vesistöihin, kulttuurihistoriallisesti merkittäviin kohteisiin ja luonnon virkistysarvoon ei vielä ole voitu tehdä rahallista arviota.

Arvioitaessa terveysvaikutuksia käytetään altistuvana väestönä taulukossa 5-1 esitettyjä väestömääriä vuonna 1996. Koska Etelä-Suomen läänin alueella dieselvetoinen rautatieliikenne on nykyisin marginaalista, tarkastellaan tätä aluetta vain sinne muualla Suomessa rautatieliikenteestä syntyvien kaukokulkeutuvien päästöjen osalta. Etelä-Suomen lääni perustettiin vuoden 1997 syyskuussa ja sen osalta on käytetty vuoden 1997 lopun väestötietoja.

Taulukko 5-1 Altistuva väestömäärä koko maassa vuonna 1996 ja Etelä-Suomen läänissä vuonna 1997 (Tilastokeskus 1997a, 1998)

Väestöryhmä	Taajamat	Haja-asutusalueet	Yhteensä
Koko maa (väestö 31.12.1996)			
Aikuiset	3 100 000	980 000	4 080 000
Lapset (alle 16 vuotta)	790 000	250 000	1 030 000
Koko väestö	3 900 000	1 200 000	5 100 000
Yli 30-vuotiaat (61 %)	2 400 000	750 000	3 100 000
Yli 65-vuotiaat	560 000	180 000	740 000
Astmaatikot (3,5 %)	140 000	40 000	180 000
Etelä-Suomen lääni (väestö 31.12.1997)			
Aikuiset	1 490 000	150 000	1 640 000
Lapset (alle 16 vuotta)	360 000	40 000	400 000
Koko väestö	1 850 000	190 000	2 040 000
Yli 30-vuotiaat (60 %)	1 110 000	110 000	1 220 000
Yli 65-vuotiaat	250 000	20 000	270 000
Astmaatikot (3,5 %)	64 700	6 600	71 300
Muu Suomi (väestö 31.12.1996)			
Aikuiset	1 870 000	590 000	2 460 000
Lapset (alle 16 vuotta)	480 000	150 000	630 000
Koko väestö	2 350 000	740 000	3 100 000
Yli 30-vuotiaat (61 %)	1 430 000	450 000	1 910 000
Yli 65-vuotiaat	360 000	110 000	470 000
Astmaatikot (3,5 %)	82 000	26 000	108 000

Astmaatikkojen määränä on käytetty ExternE:ssä arvioitua osuutta 3,5 % väestöstä (Euroopan komissio 1997a). Ongelmana astmaatikkojen määrän arvioinnissa on astman määrittely. KELA:n erityiskorvattaviin astmalääkkeisiin oikeutettuja on Suomessa

2,8 % väestöstä (Kansaneläkelaitos 1996), mutta eräiden arvioiden mukaan astmaattikoja olisi jopa 5 % väestöstä (Keuhkovammaliitto).

5.1.1 Kuolleisuusriski

ExternE-tutkimuksessa käytiin läpi lukuisia eri selvityksiä ilman epäpuhtauspitoisuuksien ja kuolleisuuden riippuvuudesta. Tässä suoritettut arviot perustuvat ExternE-projektissa suositeltuihin altistus-vaikutusfunktioihin. (Euroopan komissio 1997a)

ExternE-projektissa erotettiin toisistaan kaksi erilaisista syistä johtuvaa kuolleisuusvaikutusta. "*Akuuteiksi kuolemantapauksiksi*" kutsuttiin tapauksia, jotka johtuvat vallitsevasta ilman epäpuhtauspitoisuudesta, esimerkiksi huonokuntoisten yksilöiden altistumisesta äkillisille korkeammille pitoisuuksille. "*Krooniseksi kuolleisuudeksi*" kutsuttiin jonkin alueen väestössä tapahtuvaa elinvuosien menetystä, joka johtuu monivuotisesta kuormituksesta. Akuutissa tapauksessa keskimääräisen eliniän lyhenemisen todettiin olevan noin yhdeksän kuukautta. Kroonisessa kuolleisuudessa yksi henkilö saattaa menettää useita vuosia tai menetetyt elinvuodet voivat jakautua väestössä tasaisemmin. Pope ym. (1995) tutkimuksiin perustuvat "krooniselle kuolleisuudelle" laaditut altistus-vaikutusfunktiot arvioivat siis hiukkasten vuoksi yhden kalenterivuoden aikana menetettyjä elinvuosia (YOLL), eivät kuolemantapausten lukumäärää. Tässä selvityksessä käytetyt ilman epäpuhtauspitoisuuden ja kuolleisuusriskin väliset yhteydet sekä käytetyt yksikköarvot on koottu seuraavaan taulukkoon.

Taulukko 5-2 Tutkimuksia ilman epäpuhtauspitoisuuden ja kuolleisuusriskin yhteydestä sekä käytettävät yksikköarvot (1997 rahassa)

Päästö	Tutkimus	Funktio /YOLL ¹	Altistuva väestö	Yksikköarvo
Nitraatti ja PM ₁₀ (energiantuotannon suorat hiukkaspäästöt)	Pope ym. (1995)	0,00072	yli 30- vuotiaat	485 000 mk /menetetty elinvuosi
PM _{2,5} (dieselhiukkaset ja sulfaatti)	Pope ym. (1995)	0,0012	yli 30- vuotiaat	485 000 mk /menetetty elinvuosi
Päästö	Tutkimus	Funktio /tapaukset	Altistuva väestö	Yksikkö- kustannus
Nitraatti ja PM ₁₀ (energiantuotannon suorat hiukkaspäästöt)	Spix ja Wichmann (1996), Verhoeff ym. (1996)	0,040 %	koko väestö	668 000 mk /tapaus
PM _{2,5} (dieselhiukkaset ja sulfaatti)	Spix ja Wichmann (1996), Verhoeff ym. (1996)	0,068 %	koko väestö	668 000 mk /tapaus
SO ₂	Anderson ym. (1996), Touloumi ym. (1996)	0,072 %	koko väestö	668 000 mk /tapaus
Otsoni	Sunyer ym. (1996)	0,059 %	koko väestö	668 000 mk /tapaus

¹YOLL ilmaisee yhden kalenterivuoden aikana altistuvassa väestössä menetetyt elinvuodet yhteensä, ei kuolemantapausten lukumäärää (YOLL = Years of life lost).

Käytettyjen pitoisuuksien arviointi on kuvattu luvussa 4 ja altistuvat väestömäärät taulukossa 5-1. Rikkidioksidin vaikutus on arvioitu vain dieseljunien liikennöintialueella. Dieselhiukkasten, sulfaatin ja nitraatin vaikutuksia on arvioitu Etelä-Suomen kaukokulkeuma-alueella sekä taajamissa että haja-asutusalueilla ja otsonin vain haja-asutusalueilla.

“Akuutti kuolleisuus”

Akuutille kuolleisuudelle laaditut altistus-vaikutusfunktiot arvioivat sitä, kuinka paljon kuolleisuus lisääntyy normaaliin kuolleisuuteen nähden eli kuolemantapausten lukumäärää eikä väestön menettämiä elinvuosia. ExternE-projektissa suositeltu vuoden 1995 hintatasolla ollut yksikkökustannus 116 250 ECU muunnetaan Suomen markoiksi vuoden 1995 keskimääräisellä valuuttakurssilla ja korjataan vuoden 1997 hintatasoon kulluttajahintaindeksillä. Tällöin yksikkökustannukseksi saadaan 668 000 mk tapaukselta. Altistuvana väestönä on koko väestö. Normaali keskimääräinen vuotuinen kuolleisuus Suomessa on 0,9 % väestöstä. Tulokset on esitetty taulukossa 5-3.

Taulukko 5-3 Dieseljunaliikenteen aiheuttamien hiukkas-, rikkidioksidi- ja otsonipitoisuuksien “akuutteja kuolemantapauksia” lisäävä vaikutus

	Diesel- hiukkaset	Sulfaatti	Nitraatti	SO ₂	Otsoni	Yhteensä
Altistuva väestö						
Taajamat	2 350 000	2 350 000	2 350 000	2 350 000	-	
Haja-asutusalueet	740 000	740 000	740 000	740 000	740 000	
Etelä-Suomen lääni	2 040 000	2 040 000	2 040 000	-	190 000	
Pitoisuudet, µg/m³						
Taajamat	0,0073	0,0022	0,016	0,012	-	
Haja-asutusalueet	0,0038	0,0015	0,0053	0,0065	0,2	
Etelä-Suomen lääni	0,0038	0,0015	0,0053	-	0,2	
Kuolleisuuden lisäys, lukumäärä						
Taajamat	0,11	0,03	0,14	0,19	-	0,48
Haja-asutusalueet	0,02	0,01	0,015	0,033	0,84	0,91
Etelä-Suomen lääni	0,05	0,02	0,042	-	0,21	0,32
Yhteensä	0,18	0,06	0,20	0,22	1,1	1,7
Kustannukset, milj. mk vuodessa						
Taajamat	0,07	0,02	0,10	0,13	-	0,32
Haja-asutusalueet	0,01	0,01	0,01	0,02	0,56	0,61
Etelä-Suomen lääni	0,03	0,01	0,03	-	0,14	0,22
Yhteensä	0,12	0,04	0,13	0,15	0,70	1,1

“Krooninen kuolleisuus”

Altistuvana väestönä menetettyjä elinvuosia (YOLL) arvioitaessa on yli 30-vuotias väestö. ExternE-projektissa suositeltu vuoden 1995 hintatasolla ollut yhden elinvuoden arvo 84 330 ECU muunnetaan Suomen markoiksi vuoden 1995 keskimääräisellä valuuttakurssilla ja korjataan vuoden 1997 hintatasoon kuluttajahintaindeksillä. Tällöin yksikkökustannukseksi saadaan 485 000 mk menetetyltä elinvuodelta. Tulokset on esitetty taulukossa 5-4.

Taulukko 5-4 Dieseljunaliikenteen aiheuttamista hiukkaspitoisuuksista johtuva “krooninen kuolleisuus” eli elinvuosien menetys (YOLL)

	Diesel- hiukkaset	Sulfaatti	Nitraatti	Yhteensä
Altistuva väestö				
Taajamat	1 430 000	1 430 000	1 430 000	
Haja-asutusalueet	450 000	450 000	450 000	
Etelä-Suomen lääni	1 220 000	1 220 000	1 220 000	
Pitoisuudet, $\mu\text{g}/\text{m}^3$				
Taajamat	0,0073	0,0022	0,016	
Haja-asutusalueet	0,0038	0,0015	0,0053	
Etelä-Suomen lääni	0,0038	0,0015	0,0053	
Menetetyt elinvuodet, lukumäärä				
Taajamat	13	3,5	16	32
Haja-asutusalueet	2,1	0,8	1,7	4,6
Etelä-Suomen lääni	5,6	2,2	4,7	12
Yhteensä	20	6,5	23	50
Kustannukset, milj. mk vuodessa				
Taajamat	6,1	1,7	8,0	15,7
Haja-asutusalueet	1,0	0,4	0,8	2,2
Etelä-Suomen lääni	2,7	1,1	2,3	6,1
Yhteensä	9,8	3,2	11	24

Kuolleisuuden aiheuttamat kustannukset yhteensä

Dieseljunien päästöjen aiheuttaman kuolleisuuden kustannukset on arvioitu yhteensä noin 25 milj. markaksi vuodessa. Tästä valtaosa aiheutuu “kroonisesta kuolleisuudesta”. Seuraavassa taulukossa 5-5 on esitetty yhteenvedo kuolleisuuden aiheuttamista kustannuksista.

Taulukko 5-5 Dieseljunaliikenteen aiheuttaman "akuutin ja kroonisen" kuolleisuuden kustannukset yhteensä, milj. mk/a (1997 rahassa)

Kustannukset alueittain	Diesel-hiukkaset	Sulfaatti	Nitraatti	SO ₂	Otsoni	Yhteensä
Taajamat	6,1	1,7	8,1	0,13	0	16,1
Haja-asutusalueet	1,0	0,4	0,9	0,02	0,6	2,9
Etelä-Suomen lääni	2,8	1,1	2,3	0	0,1	6,3
Yhteensä, milj. mk/a ¹	9,9	3,2	11,2	0,15	0,70	25,2

¹ Kaikkien rivien ja sarakkeiden summat eivät täsmää, sillä lukuja on pyöristetty.

5.1.2 Sairastuvuusriski

Taulukkoon 5-6 on koottu kaikki ExternE:ssä (Euroopan komissio 1997a) sairastuvuusriskin arviointiin suositellut altistus-vaikutusfunktiot sekä yksikköarvot hintatasolla 1997. Arviot suoritetaan käyttämällä kahdesta eri lähteestä olevia yksikköarvoja. Toisaalta käytetään ExternE-projektissa suositeltuja vuoden 1995 tasolla olleita yksikköarvoja, jotka tässä on muutettu vuoden 1997 tasolle kuluttajahintaindeksin avulla. Toisaalta käytetään suomalaiseseen contingent valuation -tutkimukseen perustuvia yksikköarvoja. Näitä täydennetään osittain ExternE:ssä suositelluin arvoin, sillä kaikille oireille ei kotimaisessa tutkimuksessa muodostettu yksikköarvoja. (Energia-Ekono Oy 1998b).

Taulukko 5-6 Tutkimuksia ilman epäpuhtauspitoisuuden ja sairastuvuusriskin yhteydestä sekä erilaisten sairauksien yksikkökustannuksia.

Oire	Tutkimus	Sairastuvuuden lisääntyminen ^{1,2}	Altistuva väestö	Yksikköarvo (ExternE) - mk -	Yksikköarvo (suom. tutk.) - mk -
Hiukkaset					
Astma, keuhkoputkia laajentavien lääkkeiden käyttö	Dusseldorp ym. 1995	0,163-0,272	astmaattiset aikuiset	213	138
Astma, yskä	Dusseldorp ym. 1995	0,168-0,280	astmaattiset aikuiset	40	91
Astma, hengityksen vinkuminen	Dusseldorp ym. 1995	0,061-0,101	astmaattiset aikuiset	43	97
Astma, keuhkoputkia laajentavien lääkkeiden käyttö	Roemer et ym. 1993	0,078-0,129	astmaattiset lapset	213	138
Astma, yskä	Pope ja Dockery 1992	0,133-0,223	astmaattiset lapset	40	91
Astma, hengityksen vinkuminen	Roemer ym. 1993	0,103-0,172	astmaattiset lapset	43	97
Lasten krooninen yskä	Dockery ym. 1989	0,00207-0,00346	lapset	1 293	1 268

Oire	Tutkimus	Sairastuvuuden lisääntyminen ^{1,2}	Altistuva väestö	Yksikköarvo (ExternE) - mk -	Yksikköarvo (suom. tutk.) - mk -
Lasten keuhkoputkentulehdus	Dockery ym. 1989	0,00161- 0,00269	lapset	1 293	1 267
Rajoittuneen toimintakyvynpäivä ⁴	Ostro 1987	0,025- 0,042	aikuiset	431	568
Sairaalisäännöto, hengitystieoireilu	Dab ym. 1996	2,07E-6- 3,46E-6	koko väestö	45 218	10 619
Sairaalisäännöto, aivoverisuoniin vaikuttava sairaus	Wordley ym. 1997	5,04E-6- 8,42E-6	koko väestö	45 218	10 619
Sairaalisäännöto, sydämen vajaatoiminta	Schwartz ja Morris 1995	1,85E-5- 3,09E-5	yli 65-vuotiaat	45 218	10 619
Krooninen keuhkoputkentulehdus, uusi tapaus	Abbey ym. 1995	4,9E-5- 7,8E-5	aikuiset	603 000	603 000 ³
Syöpäriski, ei fataali syöpä	Pilkington ja Hurley 1997	4,86E-7	koko väestö	2 586 000	2 586 000 ³
Rikkidioksidi SO₂					
Sairaalisäännöto, hengitystieoireilu	Ponce de Leon 1996	2,04E-6	koko väestö	45 218	10 619
Hiilimonoksidi CO					
Sairaalisäännöto, sydämen vajaatoiminta	Schwartz ja Morris 1995	5,55E-7	yli 65-vuotiaat	45 218	10 619
Otsoni					
Astmakohtaus	Whittemore ja Korn 1980	0,00429	astmaattikot	213	138
Lievästi rajoittuneen toimintakyvyn päivä ⁴	Ostro ja Rothschild 1989	0,00976	aikuiset	43	97
Sairaalisäännöto, hengitystieoireilu	Ponce de Leon 1996	3,54E-6	koko väestö	45 218	10 619
Oireilupäivä	Krupnick ym. 1990	0,033	koko väestö	43	97
Hiilivedyt					
Bentseeni: syöpäriski, ei fataali syöpä	Pilkington ja Hurley 1997	1,14E-7	koko väestö	2 586 000	2 586 000 ³
Bentso[a]pyreeni: syöpäriski, ei fataali syöpä	Pilkington ja Hurley 1997	1,43E-3	koko väestö	2 586 000	2 586 000 ³
1,3-butadieeni: syöpäriski, ei fataali syöpä	Pilkington ja Hurley 1997	4,29E-6	koko väestö	2 586 000	2 586 000 ³

¹Luvut ilmaisevat sairastuvuuden arvioidun muutoksen vuodessa pitoisuuden muuttuessa. Hiukkasten, rikkidioksidin ja hiilivetyjen vaikutuksille käytetään vuosikeskiarvoa, hiilimonoksidille suurimpia tunti-pitoisuuksia ja otsonille kuuden tunnin keskiarvoa.

²Alempaa arviota käytetään nitraatin haittojen arvioimiseksi ja ylempää dieselhiukkasten sekä sulfaatin vaikutuksille.

³Suomalaisessa tutkimuksessa ei muodostettu tälle sairaudelle tai oireelle yksikkökustannusta, joten käyttöön on otettu ExternE:ssä suositeltu yksikkökustannus.

⁴Päällekkäisyyden välttämiseksi rajoitetun toimintakyvyn päivien määrästä on vähennettävä 10 hengitystieoireista, 7 sydämen vajaatoiminnasta 45 aivoverisuonien toimintahäiriöstä johtuvaa sairaalasisäänottoa, sillä näiden tilojen edellytyksenä on, että kyseessä on myös rajoitetun toimintakyvyn päivä. Myös otsonin aiheuttamista lievästi rajoittuneen toimintakyvyn päivistä on vähennettävä astmakohtaukset.

Hiukkaset

ExternE-projektissa päädyttiin suosittelemaan tällä hetkellä käytettäväksi kolmeatoista erilaista tai eri väestöryhmiin kohdistuvaa altistus-vaikutusfunktiota, jotka on esitetty taulukossa 5-6. Altistus-vaikutusfunktioita ei ole käytettävissä kaikille tunnetuille hiukkasten aiheuttamille vaikutuksille eikä kaikissa väestöryhmissä. Seuraavissa arvioissa käytettyjen pitoisuuksien arviointi on kuvattu luvussa 4. Etelä-Suomen läänissä pitoisuusarviona on käytetty samaa pitoisuutta kuin dieseljunien liikennöintialueella haja-asutusalueilla. Käytetyt yksikköarvot on esitetty taulukossa 5-6.

Syöpäriskiä lukuunottamatta hiukkasten kaikki vaikutukset arvioidaan dieselhiukkasille, sulfaatille ja nitraatille erikseen. Syöpäriskiä arvioidaan vain dieselhiukkasille. Yhteenlasketut tulokset on esitetty taulukossa 5-7.

Taulukko 5-7 Dieseljunaliikenteen aiheuttamista hiukkaspitoisuuksista johtuvat sairastapaukset (kpl/a) ja niistä aiheutuva taloudellinen haitta (mk/a, 1997 rahassa)

Vaikutus, vaikutuksenalainen väestönosa	Tapaukset	Kustannukset ExternE-arvoin	Kustannukset suomal. Arvoin
	- kpl/a -	- mk/a -	- mk/a -
Astma, keuhkoputkia laajentavien lääkkeiden käyttö, aikuiset	517	110 000	71 000
Astma, yskä, aikuiset	532	21 000	48 000
Astma, hengityksen vinkuminen, aikuiset	192	8 000	19 000
Astma, keuhkoputkia laajentavien lääkkeiden käyttö, lapset	62	13 000	9 000
Astma, yskä, lapset	108	4 000	10 000
Astma, hengityksen vinkuminen, lapset	83	4 000	8 000
Krooninen yskä, lapset	48	62 000	61 000
Keuhkoputkentulehdus, lapset	37	48 000	47 000
Rajoittuneen toimintakyvyn päivä, aikuiset	2 250	970 000	1 300 000
Sairaalasisäänotto, hengitystieoireilu, koko väestö	0,2	11 000	2 000
Sairaalasisäänotto, aivoverisuonien toimintahäiriö, koko väestö	0,6	26 000	6 000

Vaikutus, vaikutuksenalainen väestönosa	Tapaukset - kpl/a -	Kustannukset ExternE-arvoin	Kustannukset suomal. Arvoin
		- mk/a -	- mk/a -
Sairaalasisäännotto, sydämen va- jaatoiminta, yli 65-vuotiaat	0,3	48 000	3 000
Krooninen keuhkoputkentulehdus, uusi tapaus, aikuiset	4	2 600 000	2 600 000
Syöpäriski, ei fataali syöpä, koko väestö	0,01	35 000	35 000
Taloudellinen haitta yhteensä, mk / a		3 900 000	4 200 000

Rikkidioksidi

Toistaiseksi rikkidioksidin terveysvaikutuksista arvioidaan hengitysteiden oireilusta johtuvia sairaalasisäännottoja (respiratory hospital admissions RHA) perustuen Ponce de Leon:in (1996) tutkimukseen (ks. taulukko 5-6). Rikkidioksidin aiheuttamia sairaalasisäännottoja arvioidaan vain dieseljunien liikennöintialueella, sillä rikkidioksidi muuttuu ajan kuluessa sulfaatiksi. Tämän vuoksi oletetaan, että muualla Suomessa rautatieliikenteestä pääsevä rikkidioksidi on jo suurelta osin muuntunutta kulkeutuessaan Etelä-Suomen läänin alueelle. Näillä oletuksilla rikkidioksidin aiheuttamaksi haitaksi saadaan vain 0,07 tapausta vuodessa. Taloudelliseksi haitaksi saadaan 700 mk vuodessa kotimaisin yksikköarvoin ja ExternE:ssä suositelluin yksikköarvoin 2 900 mk vuodessa (1997 rahassa).

Hiilimonoksidi

ExternE-projektissa hiilimonoksidin (CO) aiheuttamasta sydämen vajaatoiminnasta johtuvia yli 65-vuotiaiden sairaalasisäännottoja on suositeltu arvioitavaksi Schwartz ja Morris (1995) mukaan (ks. taulukko 5-6). Luvussa 4 häikäpitoisuudeksi arvioitiin taajamissa $0,0035 \text{ mg/m}^3$ ja haja-asutusalueilla $0,002 \text{ mg/m}^3$. Nopean muutunnan vuoksi hiilimonoksidi aiheuttaa terveysvaikutuksia vain alueilla, joilla sitä syntyy, joten Etelä-Suomen läänin väestö on rajattu pois tarkastelussa, sillä tällä alueella dieselveitoinen rautatieliikenne on marginaalista. Näillä oletuksilla rikkidioksidin aiheuttamaksi haitaksi saadaan vain 0,8 tapausta vuodessa. Taloudelliseksi haitaksi saadaan 8 700 mk vuodessa kotimaisin yksikköarvoin ja ExternE:ssä suositelluin yksikköarvoin 37 000 mk vuodessa (1997 rahassa).

Otsoni

Arvio otsonin terveysvaikutusten kustannuksista on esitetty seuraavassa taulukossa. Arviossa käytetyt altistus-vaikutusfunktiot ja yksikkökustannukset on koottu taulukkoon 5-6 ja pitoisuusarviot on esitetty luvussa 4. Otsonin haitat kohdistetaan typen oksideille ja hiilivedyille suhteessa 80:20 (Seppälä ja Jouttijärvi 1997). Rautatieliikenteen ei luvussa 4 arvioitu vaikuttavan taajamien otsonipitoisuuteen ja haja-asutusalueilla vaikutus otsonipitoisuuden 6-tunnin keskiarvon arvioitiin olevan $0,20 \text{ } \mu\text{g/m}^3$.

*Taulukko 5-8 Otsonin terveysvaikutusten aiheuttaman sairastuvuuden haitta, tapaus-
ten lukumäärä (kpl/a) ja niistä aiheutuva taloudellinen haitta (mk/a
1997 rahassa)*

Vaikutus (altistuva väestö)	Tapaukset	Kustannukset ExternE-arvoin	Kustannukset suomal. Arvoin
	- kpl/a -	- mk/a -	- mk/a -
Astmakohtaus (kaikki ast- maatikot)	28	6 000	4 000
Lievästi rajoittuneen toimin- takyvyn päivä (aikuiset)	1 500	64 000	145 000
Sairaalasisäännotot, hengi- tystieoireilu (koko väestö)	0,7	30 000	7 000
Oireilupäivä (koko väestö)	6 100	264 000	594 000
Haitta yhteensä, mk/a		364 000	750 000

Hiilivedyt

ExternE-projektissa suositeltiin syöpäriskin arvioimista bentseenille, bentso[a]pyreenille ja 1,3-butadieenille (ks. taulukko 5-6). Rautateiden aiheuttamia pitoisuuksia ei ole voitu arvioida, joten myöskään arviota haitasta ei tässä esitetä. Aiheutuvat pitoisuudet ovat hyvin alhaiset, joten hiilivetyjen aiheuttaman haitan osuus kokonaishaitasta jäisi varsin pieneksi.

Hiilivedyt muodostavat yhdessä typen kanssa otsonia. 20 % arvioiduista otsonin terveysvaikutuksista on kohdistettu hiilivedyille (Seppälä ja Jouttijärvi 1997). Kustannukset olisivat tällöin 150 000 mk vuodessa suomalaisin yksikköarvoin 73 000 mk ExternE:ssä käytetyin yksikköarvoin arvioituna (ks. taulukko 5-8).

Muut epäpuhtaudet

ExternE-projektissa ei ole päädytty suosittelemaan tässä vaiheessa typen oksidien suorien terveysvaikutusten arviointia, sillä tutkimusten näyttöä pidetään toistaiseksi riittämättömänä. Typen oksidin muodostavat yhdessä hiilivetyjen kanssa otsonia. 80 % arvioiduista otsonin terveysvaikutuksista on kohdistettu hiilivedyille (Seppälä ja Jouttijärvi 1997). Haja-asutusalueilla kustannukset olisivat tällöin 0,6 milj. mk vuodessa suomalaisin yksikköarvoin ja 0,3 milj mk ExternE:ssä käytetyin yksikköarvoin arvioituna (ks. taulukko 5-8).

Muita terveysvaikutuksia aiheuttavia yhdisteitä ovat mm. raskasmetallit. ExternE:ssä ei (vielä) ole suositeltu, että arvioita näistä sisällytettäisiin perustarkasteluihin. Syynä tähän on riittävän luotettavien altistus-vaikutusfunktioiden puute.

Sairastuvuuden aiheuttamat kustannukset yhteensä

Seuraavassa taulukossa 5-9 on esitetty yhteenvedo dieseljunaliikenteen aiheuttamien sairastapausten kustannuksista.

Taulukko 5-9 Dieseljunaaliikenteen aiheuttaman sairastuvuuden kustannukset yhteensä, milj. mk/a (1997 rahassa)

Sairastuvuus	Taajamat	Haja-asutusalueet	Etelä-Suomen lääni	Yhteensä ¹
Dieselhiukkaset	1,05	0,176	0,5	1,7
Sulfaatti	0,3	0,07	0,2	0,54
Nitraatti	1,4	0,15	0,4	1,95
Rikkidioksidi	0,001	0,0001	0	0,001
Otsoni	0	0,6	0,2	0,8
Häkä	0,007	0,001	0	0,009
Yhteensä, milj. mk/a¹	2,7	1,0	1,2	5,0

¹ Kaikkien rivien ja sarakkeiden summat eivät täsmää, sillä lukuja on pyöristetty.

5.1.3 Rakennusmateriaalien rapautuminen

Fossiilisten polttoaineiden poltosta peräisin olevalla happamoittavalla laskeumalla on yhteys rakennusten ja materiaalien syöpymiseen. Keskeisimmät syöpymistä aiheuttavat yhdisteet ovat rikkidioksidi, hiukkaset ja kloridit. Myös typen oksidit voivat olla osallisia prosessissa, mutta niiden vaikutuksesta rakennusmateriaaleihin ei olla vielä täysin selvillä.

Vuonna 1984 käynnistettiin Pohjoismaiden Ministerineuvoston rahoituksella pohjoismainen yhteistyöhanke, jonka päämääränä oli tuottaa luotettavaa tietoa ilman laadusta johtuvan korroosion kustannuksista (Kucera ym., 1993). Ensin tehtiin inventaario ulkoilmassa olevien rakennusten ja muiden rakenteiden materiaalien pinta-aloista Tukholmassa ja Sarpsborgissa Norjassa. Seuraavaksi kehitettiin malli ilman epäpuhtauksista aiheutuvien korroosiohaittojen laskemiseksi. Mallia sovellettiin Tukholmaan, Sarpsborgiin ja Prahaan.

Vuonna 1994 valmistui ruotsalainen tutkimus Svenska miljöräkenskaper SWEEA (Konjunkturinstitutet och Statistiska Centralbyrån, 1994). Tämän tutkimuksen rakennusmateriaaleja koskeva osa, johon myös Kucera osallistui, pohjautui hänen aiempaan tutkimukseensa. Siinä menetelmää kehitettiin edelleen ja arvioitiin haitta myös muille materiaaleille kuin varsinaisille rakennuksille. Kokonaisvaurioksi saatiin vuoden 1991 tasolla 1 900 miljoonaa kruunua, mikä kattaa kaikista päästölähteistä aiheutuvat haitat.

Tässä suoritetaan haitta-arvio SWEEA:ssa esitettyihin altistus-vaikutusfunktioihin perustuen. Ne ilmaisevat huolto- ja vaihtotiheyden muutoksen ulkoilman rikkidioksidipitoisuuden muuttuessa. Arviointi sisältää seuraavat vaiheet:

1. Materiaalimäärien arviointi
2. Arvio pitoisuudesta, jolle materiaalit altistuvat
3. Arvio huolto- ja vaihtotiheydestä
4. Huolto- ja uusimiskustannusten arviointi

Suomessa ei ole tehty inventaarioita ulkoilmalle alttiina olevista materiaalmääristä. Tässä selvityksessä Suomen materiaalmäärät arvioidaan soveltaen ruotsalaisia tutki-

muksia suhteuttamalla määrät asukaslukuun. Näin voitaneen menetellä, sillä tämän tutkimuksen kohdealue täyttää ainakin kohtuullisen hyvin seuraavat tärkeät kriteerit, joiden suhteen vertailualueiden tulisi olla samantapaisia: käytettävät materiaalit, ilmasto, päästöjen laatu ja pitoisuudet sekä materiaali- ja huoltokustannukset ovat samaa suuruusluokkaa. Arviointi suoritetaan vain alueella, jolla on vielä dieselvetoista junaliikennettä eli Etelä-Suomen läänin väestö ja siten myös altistuvat materiaalit on rajattu pois tarkastelusta.

Vuonna 1996 tarkastelualueella taajamien asukasluku oli 2,1 miljoonaa ja haja-asutusalueiden 1,0 miljoonaa kun Tukholman asukasluku materiaali-inventaarion aikana oli 1,4 miljoonaa asukasta. Tämän perusteella arvioidaan materiaalimäärät, jotka on esitetty taulukossa 5-11.

Taulukko 5-10 Materiaalien huolto- tai vaihtotiheys rikkidioksidipitoisuuden ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) funktiona sekä huolto- ja vaihtokustannukset, mk/m^2 (1997 rahassa)

Materiaali	Huolto-/vaihtotiheys - 1/a -	Huolto- kustannus - mk/m^2 -	Vaihto- kustannus - mk/m^2 -
Rappaus (maalattu)	$(15,5 + 0,124 \cdot [\text{SO}_2]) \cdot 10^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$		272
Bitumihuopa	$(47,7 + 0,327 \cdot [\text{SO}_2]) \cdot 10^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$		208
Maalattu teräs	$(103 + 1,37 \cdot [\text{SO}_2]) \cdot 10^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$	100	
Maalattu kuumasinkitty teräs	$(81,5 + 0,803 \cdot [\text{SO}_2]) \cdot 10^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$	72	
Nauhapinnoitettu teräs (uusi)	$(38,0 + 0,155 \cdot [\text{SO}_2]) \cdot 10^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$	86	
Nauhapinnoitettu teräs (uud. maalattu)	$(62,9 + 0,370 \cdot [\text{SO}_2]) \cdot 10^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$	86	
Nauhapinnoitettu Al (uusi)	$(32,2 + 0,107 \cdot [\text{SO}_2]) \cdot 10^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$	86	
Nauhapinnoitettu Al (uud. maalattu)	$(62,9 + 0,370 \cdot [\text{SO}_2]) \cdot 10^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$	86	
Maalipinta rappauksella	$(18,8 + 0,278 \cdot [\text{SO}_2]) \cdot 10^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$	79	
Maalipinta puulla	$(87,5 + 1,03 \cdot [\text{SO}_2]) \cdot 10^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$	93	
Maalaamaton kuumasinkitty teräs	$V_{\text{corr}} = 0,29 + 0,039 \cdot \text{SO}_2$, missä V_{corr} = sinkin korroosionopeus, $\mu\text{m}/\text{a}$ ja SO_2 = rikkidioksidipitoisuus, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	levy 72 profiili 125	levy 258 lanka 57

Keskimääräiseksi dieseljunaliikenteestä johtuvaksi rikkidioksidin vuosipitoisuudeksi Suomen taajamissa muodostuu $0,0116 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja haja-asutusalueilla $0,0065 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pitoisuuksien arviointi on kuvattu luvussa 4. Materiaalien huolto- ja vaihtotiheys arvioidaan käyttämällä taulukossa 5-10 esitettyjä SWEEA:n laatimia altistusvaikutusfunktioita. Huolto- ja uusimiskustannukset arvioidaan käyttämällä samassa taulukossa esitettyjä yksikkökustannuksia. Kotimaisia yksikkökustannuksia ei myös-

kään ole ollut saatavilla, joten yksikkökustannuksina käytetään Ruotsissa tilastoituja kustannuksia. Tulokset on koottu taulukkoon 5-11.

Taulukko 5-11 Rikkidioksidille altistuvat materiaalmäärät (1000 m²) ja dieseljunaliikenteen rikkidioksidipäästöjen aiheuttamien materiaalivaurioiden kustannukset, mk vuodessa (1997 rahassa)

Materiaali	Taajamat		Haja-asutusalueet		Yhteensä
	Materiaali-	Kustan-	Materiaali-	Kustan-	Kustan-
	määrä	nukset	määrä	nukset	nukset
	- 1000 m ² -	- mk/a -	- 1000 m ² -	- mk/a -	- mk/a -
Kuumasinkitty teräs, levy (huollettava)	940	1 500	500	400	2 000
Kuumasinkitty teräs, levy (vaihdettava)	940	5 500	500	1 500	7 000
Kuumasinkitty teräs, profiili	4 300	4 100	2 200	1 200	5 000
Kuumasinkitty teräs, lanka	950	800	500	200	1 000
Rappaus (maalattu)	39 600	16 000	20 000	4 400	20 000
Bitumihuopa	25 000	20 000	13 000	5 600	25 000
Maalattu teräs	4 100	6 500	2 100	1 900	8 000
Maalattu kuumasinkitty teräs	16 600	11 000	8 500	3 100	14 000
Nauhapinnoitettu teräs (uusi)	10 700	1 650	5 400	450	2 100
Nauhapinnoitettu teräs (uud. maalattu)	1 900	700	1000	200	900
Nauhapinnoitettu alumiini (uusi)	5 100	500	2 600	200	700
Nauhapinnoitettu alumiini (uud. maalattu)	900	300	500	100	400
Maalipinta rappauksella	39 600	10 000	20 000	2 900	13 000
Maalipinta puulla	62 300	69 000	32 000	20 000	89 000
Yhteensä		150 000		40 000	190 000

5.1.4 Likaantuminen

Ilmansaasteet aiheuttavat myös materiaalien likaantumista. Likaantumisen syynä ovat pääasiassa noki- ja muut hiukkaset. Ympäristön likaantuminen koskee paitsi rakennetun ympäristön materiaaleja myös puistoja ja viheralueita sekä luonnonympäristöjä. Sisätilojen siivous ja ikkunoiden pesu aiheuttavat kustannuksia; kustannuksia syntyy myös tekstiilien puhtaanapidosta. Lisäksi rakenteiden ja katujen puhdistus ja kunnossapito aiheuttavat huomattavia kustannuksia.

ExternE Transport -projektissa päädyttiin käyttämään Rabl ym. (1996) mukaan seuraavaa yhteyttä hiukkaspitoisuuden ja likaantumiskustannusten välillä:

$$y = \text{TSP} \cdot P \cdot w, \text{ missä}$$

y = likaantumiskustannus

TSP = junaliikenteestä aiheutuva hiukkaspitoisuuden ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) vuosikeskiarvo

P = asukasluku

w = $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ aiheuttama puhdistuskustannus henkeä kohden

Puhdistuskustannuksena käytettiin 1 ECU henkilöä kohden (Euroopan komissio 1997a). Vuoden 1995 valuuttakurssilla muunnettuna tämä vastaa 5,64 mk ja kuluttajahintaindeksillä vuoden 1997 tasolle muutettuna 5,75 mk.

Dieseljunaliikenteen aiheuttama kokonaisleijuma (TSP) koostuu pääosin resuspensiosta, dieselhiukkasista sekä muista päästöistä syntyvistä hiukkasista (sulfaatti ja nitraatti). Resuspensio on määräävä tekijä arvioitaessa likaantumisen kokonaishaittaa. Arvioitaessa dieselhiukkasten, sulfaatin ja nitraatin aiheuttamaa likaantumishaittaa altistuvaksi väestöksi oletetaan koko väestö, sillä pienet hiukkaset kulkeutuvat kauas. Resuspensio vaikuttaa pääasiassa radan välittömässä läheisyydessä olevaan väestöön, sillä suuri osa resuspendoituneista hiukkasista on kooltaan melko suuria, joten ne laskeutuvat nopeasti ja pitoisuudet laskevat nopeasti radalta etäännyttäessä.

Tämän vuoksi resuspension aiheuttamaa likaantumishaittaa arvioitaessa käytetään huomattavasti pienempää väestöä kuin kaukokulkeutuvien hiukkasten aiheuttamaa likaantumishaittaa arvioitaessa. Väestömääräksi otetaan sadan metrin etäisyydellä radasta asuva väestö eli noin 150 000 asukasta, joista 90 % eli 135 000 arvioidaan asuvan taajamissa.

Resuspensiosta johtuvaksi hiukkaspitoisuudeksi arvioitiin luvussa 4 suuntaa-antavasti taajamissa $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja haja-asutusalueilla $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Diesel- ja sähkövetoisen junaliikenteen suoritteisiin suhteutettuna dieselvetoisen liikenne aiheuttaisi siis $0,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pitoisuuden taajamissa ja $0,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pitoisuuden haja-asutusalueilla. Tällainen jako pitää sisällään oletuksen ettei haitta riipu junatyypistä. Arvio on jonkinasteinen yksinkertaistus, sillä mm. junien nopeudet vaikuttavat haitan suuruuteen, mutta tätä vaikutusta ei ole tämän selvityksen puitteissa mahdollista ottaa huomioon.

Dieselhiukkasten, nitraatin ja sulfaatin aiheuttaman likaantumisen haittakustannukset voidaan kohdistaa hiukkas-, typpi- ja rikkipäästöille. Näin ei kuitenkaan ole mahdollista menetellä resuspension kohdalla. Tämän vuoksi resuspension aiheuttamaa likaantumishaittaa onkin mielekkäintä tarkastella suoritteelle (jkm) kohdistettuna. Arvio haitasta on esitetty taulukossa 5-12.

*Taulukko 5-12 Dieseljunaliikenteen aiheuttamasta hiukkaspitoisuudesta johtuvan li-
kaantumisen haitta, milj. mk/a (1997 rahassa)*

	Taajamat	Haja-asutusalueet	Yhteensä
Altistuva väestö			
Koko väestö	3 900 000	1 200 000	5 100 000
Resuspensiolle altistuva väestö	135 000	15 000	150 000
Pitoisuus, $\mu\text{g}/\text{m}^3$			
Dieselhiukkaset	0,0073	0,0038	
Nitraatti	0,016	0,0053	
Sulfaatti	0,0022	0,0015	
Resuspensio	0,67	0,17	
Yksikköhaitta	5,75 mk henkilöltä / $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$		
Haitta, milj. mk/a			
Dieselhiukkaset	0,16	0,03	0,19
Nitraatti	0,36	0,04	0,40
Sulfaatti	0,05	0,01	0,06
Resuspensio	0,52	0,01	0,53
Yhteensä	1,1	0,1	1,2

Resuspension aiheuttamaksi haitaksi arvioitiin siis taajamissa 0,52 milj. mk ja haja-asutusalueilla 0,01 milj. mk eli yhteensä 0,53 milj. mk. Dieseljunien liikennesuorite oli 13,6 milj. jkm vuonna. Tästä 0,7 milj. jkm liikennöitiin taajamissa ja 12,9 milj. jkm haja-asutusalueilla. Suoritteelle kohdistettuna tämä tarkoittaa taajamissa 0,76 mk, haja-asutusalueilla 0,0011 mk ja keskimäärin 0,04 mk yksikköhaittaa juna-kilometriä kohden.

5.1.5 Happamoittavan laskeuman aiheuttamat metsävauriot

Ilmansaasteiden ja metsävaurioiden määrän yhteydestä on olemassa vain muutama karkea arvio (Ahonen ja Leiviskä 1993, Konjunkturinstitutet & Statistiska Centralbyrån 1994, Nilsson 1991, Sverdrup 1993). Koska ilmansaasteiden ja metsävaurioiden määrän yhteydestä on olemassa vain muutama karkea arvio, tässä selvityksessä voidaan esittää vain laskentaesimerkki käyttäen lähtökohtana näiden tutkimusten tuloksia. Lähtökohtana esitettävässä arviossa on, että happamoitumisesta aiheutuva vuosittainen puunkasvun menetys seuraavan sadan vuoden aikana olisi 0,1 % edellisen vuoden kasvusta.

Arvioissa otetaan huomioon vuotuinen kasvu ja kokonaispoistuma sekä hyödyntämisaste. Vuosina 1990 - 1994 metsien vuosittainen kasvu on ollut keskimäärin $75,1 \text{ milj. m}^3$ (Tilastokeskus 1996). Tällöin vuotuinen puunkasvun menetys olisi $75 \text{ 100 m}^3/\text{a}$. Vuotuisen kokonaispoistuman ja kasvun avulla voidaan arvioida metsien hyödyntämisaste. Haitan pitkäaikaisesta luonteesta johtuen laskentakorkona käytetään yhtä prosenttia. Taloudellinen menetys lasketaan käyttämällä mänty-, koivu- ja kuusitukkipuun ja -kuitupuun kantohintoja.

Näitä lähtötietoja käyttämällä seuraavassa taulukossa on arvioitu dieseljunaliikenteestä aiheutuvasta happamoittavasta laskeumasta johtuvien metsävaurioiden vuotuiset kustannukset. Kustannukset on arvioitu 243 000 markaksi vuodessa.

Taulukko 5-13 Dieseljunaliikenteen rikki- ja typpipäästöjen aiheuttamasta happamoittavasta laskeumasta johtuvat metsävauriot, markkaa vuodessa (1997 rahassa)

	SO ₂	NO _x	NH ₃	Yhteensä
Happamoittavan laskeuman aiheuttama kokonaishaitta		360 milj. mk/a		
Päästön osuus haitasta, %	50 %	30 %	20 %	100 %
Päästön osuus haitasta, milj. mk/a	180	108	72	360
Kotimaisten päästöjen osuus laskeumasta, %	12 %	16 %		
Kotimaisten päästöjen osuus haitasta, milj. mk/a	22	17		
Kotimaisten päästöjen aiheuttama haitta, mk/t	216	66		
Dieseljunaliikenteen päästöt, t/a	88	3 375	0	
Dieseljunaliikenteen haitta, mk/a	19 000	224 000	0	243 000

5.1.6 Otsonin aiheuttamat metsävauriot

YK:n Euroopan talouskomission (UN ECE) alaisuudessa on meneillään kriittisten tasojen kartoitus otsonin ja muiden ilmansaasteiden kasvillisuushaittojen arvioimiseksi. ECE:n otsonin kriittisten tasojen työssä on sovittu, että altistuskokeiden altistusvaikutusfunktiot ja mitatut otsonipitoisuudet esitetään altistusindeksin avulla. Tässä esitettävän arvion perustana käytetään ECE:n alustavaa arviota, jonka mukaan 10 000 ppb-h annos aiheuttaa 10 % kasvutappion herkille puulajeille.

Etelä-Suomessa kasvukauden aikainen altistus oli vuosina 1993-1996 keskimäärin 6 600 ppb-h ja Pohjois-Suomessa 3 800 ppb-h (Metsäntutkimuslaitos 1997). Pohjois- ja Etelä-Suomen metsävarojen tilavuuksilla painotettuna tämä merkitsisi 5,8 % vuotuista kasvumenetystä eli 4,3 milj. m³ vuotuista tappiota. Otsonin haittavaikutusten oletetaan kohdistuvan vain tarkasteluvuoteen eli haittaa käsitellään vain yksivuotisena, mikä käytännössä aliarvioi haitan suuruutta. Arvioissa otetaan huomioon vuotuinen kasvu ja kokonaispoistuma sekä hyödyntämisaste. Taloudellinen menetys lasketaan käyttämällä mänty-, koivu- ja kuusitukkipuun sekä -kuitupuun kantohintoja.

Taulukossa 5-14 esitetyn arvion mukaan dieseljunaliikenteen otsonia muodostavien päästöjen haitta olisi hieman vajaa miljoona markkaa vuodessa.

Taulukko 5-14 Dieseljunaliiikenteen päästöistä aiheutuvasta otsonista johtuvat yksi-vuotiset metsävauriot, markkaa vuodessa (1997 rahassa)

	NO _x	Hiilivedyt	Yhteensä
Otsonin aiheuttama kokonaishaitta		480 milj. mk/a	
Osuus haitasta, %	80 %	20 %	100 %
Osuus haitasta, milj. mk/a	384	96	480
Kotimaisten päästöjen osuus, %	16 %	16 % ¹	
Kotimaisten päästöjen osuus haitasta, milj. mk/a	61	15	77
Kotimaisten päästöjen aiheuttama haitta, mk/t	236	38	
Dieseljunaliiikenteen päästöt, t/a	3 375	468	
Dieseljunaliiikenteen haitta, mk/a	798 000	18 000	816 000

¹ Koska tiedossa ei ole, miten suuri osuus hiilivedyistä on peräisin kotimaasta, laskelmassa oletetaan hiilivetypäästöjen olevan peräisin kotimaasta samassa suhteessa kuin typpipäästöjen.

5.1.7 Viljelykasvivauriot

Alailmakehän otsoni on merkittävin satotappioiden aiheuttaja. Se aiheuttaa sekä hehtaarisatojen pienenemistä että näkyviä vaurioita, kuten lehdissä ja hedelmissä esiintyviä pilkkuja, jotka saattavat aiheuttaa kokonaisten tuotantoerien hylkäämisen. Myös happaman laskeuma vaurioittaa viljelykasveja, mutta se on kuitenkin haitallisempi metsille kuin viljelykasveille, koska viljelykasveja suojellaan peltojen kalkituksen avulla.

Euroopan unioni on hyväksynyt kasvillisuuden suojelemiseksi vuorokausikeskiarvon rajaksi 65 µg/m³, mikä ylittyy kesäisin yleisesti Suomen kaikilla mittausasemilla. Otsonin vaikutus viljelykasveihin Suomen oloissa on vielä puutteellisesti tunnettu ja joidenkin arvioiden mukaan satotappiot ovat olleet muutaman prosentin luokkaa (Ahonen ja Leiviskä 1993 ref. Kauppi ym. 1990). Laurila (Wahlström ym. 1996) on arvioinut alailmakehän otsonin vähentäneen kevätvehnäsatoja merkittävästi 1990-luvun alkupuolella haitan ollessa vuoden 1990 vallitsevilla otsonipitoisuuksilla vain pari prosenttia, mutta vuonna 1992 jopa 12 %.

Taulukko 5-15 Otsonin aiheuttamien satotappioiden laskennassa käytetyt korjatut altistus-vaikutusfunktiot. Otsonipitoisuuden yksikkönä on keskimääräinen ppb kasvukauden päivätunteina.

Viljelykasvi	Altistus-vaikutusfunktio	Vaihteluväli
Syysvehnä	$1 - 0,8 \cdot (O_3(X) / 0,148)^{2,154}$	-30 % ... + 100 %
Kevätvehnä	$1 - 0,8 \cdot 4,5576 \cdot O_3(X)$	-20 % ... + 20 %
Syysruis	$1 - 0,8 \cdot 4,5576 \cdot O_3(X)$	-40 % ... + 200 %
Ohra	$1 - 0,8 \cdot 0,8 \cdot 1,0817577 \cdot O_3(X)$	-20 % ... + 20 %
Kaura	$1 - 0,8 \cdot 0,8 \cdot 4,5576 \cdot O_3(X)$	0 % ... + 300 %
Peruna	$0,9615 - 0,8 \cdot 8,3535 \cdot O_3(X)$	-20 % ... + 20 %
Timotei, apila	$1 - 0,8 \cdot 0,8 \cdot 7,909 \cdot O_3(X)$	-30 % ... + 100 %

Tässä arvio tehdään perustuen Hasund ym. (1990) kokoamiin altistusvaikutusfunktioihin (ks. taulukko 5-15), tausta-asemilla mitattuihin otsonipitoisuuksiin, 1990-luvulla toteutuneisiin viljelypinta-aloihin ja satomääriin sekä viljelykasvien maailmanmarkkinahintoihin. Lisäksi huomioon otetaan tyypitase eli ulkomailta Suomeen kulkeutuva tyyppi. Tarkastelussa mukana olevat viljelykasvit ovat vehnä, ruis, ohra, kaura, peruna, kuivaheinä ja säilörehu. Hasundin kokoamia funktioita on korjattu ohran, kauran, kuivaheinän ja säilörehun osalta 20 % alaspäin mm. johtuen huonoista sadoista seuraavasta siirtymisestä kestävämpiin lajikkeisiin.

Vuosina 1990 - 1992 kasvukauden otsonipitoisuuden keskiarvoksi päivätunneilla on mitattu $60 - 85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ eli 30 ppb - 42,5 ppb, keskimäärin 34,5 ppb (Tilastokeskus 1994). Alailmakehän otsonipitoisuudet kasvavat noin prosentin vuodessa (Watson ym. 1990). Vuoden 1995 pitoisuus on arvioitu kasvattamalla vuosien 1990 - 1992 keskiarvoa prosentilla vuodessa, jolloin tulokseksi saadaan 36,3 ppb.

Alailmakehän otsoni muodostuu fotokemiallisesti eli auringonsäteilyn avulla typen oksideista ja hiilivedyistä. Otsonin muodostumisessa typen oksidien osuudeksi oletetaan 80 % ja hiilivetyjen (metaani ja muu VOC) osuudeksi 20 % (Seppälä ja Jouttijärvi 1997). Suomen päästölähteiden osuudeksi otsonia muodostavista yhdisteistä on arvioitu 16 % (Tilastokeskus 1997b). Luonnolliseksi taustapitoisuudeksi on arvioitu $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ eli 15 ppb (Hasund ym. 1990). Otsonin aiheuttamat yritystaloudelliset menetykset lasketaan vähentämällä nykyiset tuotot niistä tuotoista, jotka saataisiin luonnollisella otsonin taustapitoisuudella.

Yksityiskohtaisen otsonimallin puuttuessa mielekkäin tarkastelutapa haitalle on seuraava "top-down"-lähestymistapa:

1. Arvioidaan otsonin luonnon taustapitoisuuden (15 ppb) ylittävän pitoisuuden (35,2 ppb) aiheuttamat satotappiot koko Suomessa.
2. Kotimaisten päästölähteiden osuus Suomessa vaikuttavista typpipäästöistä ja arvio otsonin kokonaismuodostuksesta on 16 %. Arvioidut kokonaissatotappiot jaetaan typelle ja hiilivedyille suhteessa 80:20.
3. Lasketaan rautatieliikenteen osuus otsonia muodostavista päästöistä; typpidioksidista osuus oli 1,3 % (Tilastokeskus 1997c) ja VOC-päästöistä 0,12 % (Tilastokeskus 1998) vuonna 1996. Näiden suhteiden avulla lasketaan rautatieliikenteen osuus kaikista kotimaisista lähteistä syntyvistä satotappioista typelle ja hiilivedyille erikseen.
4. Taulukossa 5-16 on esitetty eri viljelykasvien viljelypinta-alat vuonna 1996, keskimääräinen hehtaarisato ja sen avulla arvioidut satomäärät. Hehtaarisato lasketaan vuosien 1994 - 1996 keskiarvona (Tilastokeskus 1997c), sillä tarkasteluvuoden hehtaarisatoa käyttämällä vuotuiset sääolosuhteiden vaihtelut dominoisivat. Yksikkökustannuksina käytetään EU:n tuottajahintoja vuonna 1997 (EUROSTAT 1998), jotka myös on esitetty taulukossa 5-16. Koska kuivaheinällä ja säilörehulla ei juurikaan ole markkinoita tilojen tuottaessa yleensä tarvitsemansa rehun itse, käytetään näiden osalta kustannuksena tuotantokustannusta (Maaseutukeskusten Liitto 1998).

Taulukko 5-16 Maataloustuotanto Suomessa ja viljelykasvien maailmanmarkkinahinnat

	Maa-ala yhteensä - 1000 ha -	Keskim. sato - kg/ha -	Sato - milj. kg -	Maailman- markkinahinta - mk/kg -
Syysvehnä	25	4 071	103	0,75
Kevätvehnä	87	3 845	336	0,75
Syysruis	35	2 606	92	0,72
Ohra	543	3 506	1 902	0,70
Kaura	374	3 380	1 265	0,79
Peruna	35	21 329	742	0,73
Kuivaheinä	244	4 019	979	1,39
Säilörehu	302	17 711	5 356	0,36

Seuraavassa taulukossa on esitetty arvio rautatieliikenteen päästöjen aiheuttamasta taloudellisesta haitasta. Haitasta vain noin 0,02 % eli 13 000 mk on arvioitu aiheutuvan hiilivedyistä. Tämä hyvin alhainen haitta-arvio johtuu siitä, että rautatieliikenteen osuus kotimaisista lähteistä syntyvistä VOC-päästöistä on vain 0,12 % ja hiilivetyjen painoarvoksi otsoninmuodostuksessa on puolestaan arvioitu 20 %.

Taulukko 5-17 Dieseljunaliiikenteen päästöistä muodostuvan otsonin aiheuttamat sato-vauriot, milj. mk/a (1997 rahassa)

	Osuus kokonais- haitasta - % -	Haitta - milj. mk/a -	Haitan vaihteluväli - milj. mk/a -
Syysvehnä	0,7 %	0,004	0,003 - 0,009
Kevätvehnä	5,4 %	0,033	0,037 - 0,040
Syysruis	1,4 %	0,009	0,005 - 0,026
Ohra	5 %	0,034	0,027 - 0,040
Kaura	17 %	0,105	0,105 - 0,421
Peruna	21 %	0,131	0,105 - 0,157
Kuivaheinä	41 %	0,249	0,174 - 0,498
Säilörehu	8 %	0,049	0,034 - 0,098
Yhteensä	100 %	0,61	0,48 - 1,29

5.1.8 Ilmastonmuutos

Fossiilisten polttoaineiden käytöstä ilmaan pääsevien kasvihuonekaasujen, erityisesti hiilidioksidin, lisääntymisestä ilmakehässä on seurauksena ilmaston lämpeneminen.

Koska muiden kasvihuonekaasujen kuin hiilidioksidin päästöt dieseljunaliikenteestä ovat hyvin pienet, tarkastellaan tässä vain hiilidioksidipäästöjä.

ExternE-tutkimusohjelmassa (Euroopan komissio 1997a ja 1997b) päädyttiin suosittamaan ohjelman aiemmista vaiheista poikkeavia uusia arvioita ilmaston lämpenemisen aiheuttamalle haitalle; suositeltu malli oli FUND (Institute for Environmental Studies, Amsterdam). Laskentakorkona käytettiin 1 - 3 %, jolloin saatiin tulokseksi 18 - 46 ECU/hiilidioksiditonni vuodessa. Tämä vastaa 102 - 260 mk/t vuoden 1995 kurssilla Suomen rahaksi muutettuna ja 108 - 275 mk/t vuoden 1997 markoissa OECD-maiden BKT-indeksillä muunnettuna. Käytetään haitta-arviona ylä- ja alarajan keskiarvoa eli 191 mk/t. Samaa haitta-arviota on käytetty myös suomalaisessa tutkimuksessa *Tuuli-voiman ja aurinkosähkön kilpailukyky ympäristöhyödyt huomioon ottaen* (Energia-Ekono 1998a).

Koska kyseessä on globaali haitta, otetaan käytön päästöjen lisäksi samanarvoisina huomioon polttoaineketjun alkupään päästöt. Nämä päästöt on esitetty taulukossa 3-4. Tällöin vuoden 1996 haitta-arvoksi liikennöinnin osalta saadaan 34 milj. mk ja polttoaineketjun alkupään osalta noin 2 milj. mk eli yhteensä 36 milj. mk (1997 rahassa). Alueellisesti jaettuna haitaksi taajamissa saadaan 6 milj. mk ja haja-asutusalueilla noin 30 milj. mk.

5.1.9 Dieselin polttoaineketjun haitat

Käytetään luvussa 5.1.10 esitettäviä (taulukko 5-20) kunkin päästökomponentin yksikkökustannuksia haja-asutusalueilla arvioitaessa polttoaineketjun alkupään päästöjen haittoja. Dieselin polttoaineketjun päästöt on arvioitu luvussa 3.1.2. Sähkön hankinnan polttoaineketjujen alkupään haitta-arvio on suoritettu luvussa 5.2.2.

Taulukko 5-18 Dieselin polttoaineketjun haitat sekä dieseljunaliikenteen haitat yhteensä, milj. mk/a (1997 rahassa)

Komponentti	Yksikkö-haitta - mk/t -	Haitat ulkomailla	Haitat kotimaassa - milj. mk/a -	Käytön haitat	Haitat yhteensä ¹ - milj. mk/a -
SO ₂	9 000	0,09	0,16	4,2	4,4
NO _x	1 400	0,06	0,038	16,4	16,5
PM _{2,5}	26 400	0,06	0,058	11,8	11,9
CO	4	0,0	0,0	0,009	0,009
Hiilivedyt	720	0,08	0,002	0,3	0,4
CO ₂	191			36,4	36,4
Resuspensio				0,5	0,5
Yhteensä, milj. mk/a		0,29	0,26	69,6	70,2
Infran sähkön käyttö ²	3,2 %	0,02	0,02	1,26	1,3
Yhteensä, milj. mk/a¹		0,31	0,28	70,9	71,5

¹ Kaikkien rivien ja sarakkeiden summat eivät täsmää johtuen pyöristyksistä.

² Sähkön käytön polttoaineketjun alkupään haitta-arvio on tehty lisäämällä infrastruktuurin sähkön käytön haitta-arviota 3,2 prosentilla. Haitta-arvio jakautuu tasaisesti koti- ja ulkomaille aiheutuville haitoille.

Luvussa 5.1.10 arvioidaan liikennöinnin aiheuttamaksi kokonaishaitaksi ilman infrastruktuurin sähkönkäyttöä 69,6 milj. mk (ks. taulukko 5-19). Tällöin polttoaineketjun alkupään päästöjen haittojen aiheuttama lisä tähän kokonaishaittaan on noin 0,8 %. Arvioitaessa ilmastomuutoksen haittoja käytön haittoiksi on laskettu myös polttoaineketjun alkupäässä syntyvät haitat, sillä haitta on globaali eikä päästöjen syntypaikalla ole juuri merkitystä. Polttoaineketjun alkupään haitta-arvioon liittyvää epävarmuutta on käsitelty luvussa 6.

5.1.10 Yhteenveto dieseljunaliikenteen haitoista

Taulukkoon 5-19 on koottu luvuissa 5.1.1-5.1.8 arvioidut eri tyyppisten haittojen kustannukset taajamissa ja haja-asutusalueilla. Myös terveysvaikutusten arvioinnin yhteydessä erikseen tarkasteltu kaukokulkeuma Etelä-Suomen läänin alueelle on otettu huomioon. Tulosten soveltamisen yksinkertaistamiseksi tällä alueella arvioidut haitat jaetaan taajamille ja haja-asutusalueille suhteessa näiden alueiden asukaslukuun. Tuloksissa korostuvat terveysvaikutukset ja ilmastomuutoksen vaikutukset.

Taulukko 5-19 Dieseljunaliikenteen haitat yhteensä, milj. mk/a (1997 rahassa)

Vaikutus	Taajamat	Haja-asutusalueet	Yhteensä
Kuolleisuus	21,6	3,6	25,2
Sairastuvuus	3,9	1,1	5,0
Materiaalivauriot, korroosio	0,15	0,04	0,2
Materiaalivauriot, likaantuminen	1,1	0,09	1,2
Metsävauriot, happamoituminen		0,2	0,2
Metsävauriot, otsoni		0,8	0,8
Satovauriot		0,6	0,6
Ilmastomuutos	5,9	30,5	36,4
Yhteensä, milj. mk/a	32,6	37,0	69,6
Infrastruktuurin sähkönkäyttö			1,3
Polttoaineketjun haitat ¹			0,6
Yhteensä, milj. mk/a			71,5

¹ Sisältää dieselin polttoaineketjun haittojen 0,55 milj. mk lisäksi myös sähkönkäytön polttoaineketjujen haitat 0,04 milj. mk.

Kokonaishaitat on kohdistettu eri päästökomponenteille seuraavassa taulukossa 5-20. Kun kaikki kunkin päästökomponentin aiheuttamat haitat lasketaan yhteen ja jaetaan päästömäärällä, saadaan kunkin päästökomponentin yksikkökustannus (mk/t). Käytettäessä näitä yksikkökustannuksia jonkin rataosuuden haitta-arvioihin on tuloksiin lisättävä resuspension aiheuttaman likaantumisen haitta. Infrastruktuurin tarvitseman sähkön hankinnan haitta voidaan arvioida käyttämällä luvussa 5.2.1 arvioitavaa yksikkökustannusta 5,8 p/kWh.

Taulukko 5-20 Dieseljunaliikenteen haitat päästökomponenteittain

Komponentti	Yksikkö	Taajamat	Haja-asutusalueet	Keskimäärin
SO ₂	mk/t	245 000	9 000	47 000
NO _x	mk/t	23 000	1 400	5 000
Dieselhiukkaset	mk/t	920 000	26 400	171 000
CO	mk/t	100	4	20
Hiilivedyt	mk/t	720	720	720
CO ₂	mk/t	191	191	191
Likaantuminen (resuspensio)	mk/jkm	0,76	0,0011	0,04

5.1.11 Dieseljunaliikenteen aiheuttaman haitan kohdistaminen suoritteille

Taulukossa 5-21 on esitetty dieseljunaliikenteen ympäristökustannukset vuonna 1996 liikennöidyille junakilometreille kohdistettuna.

Taulukko 5-21 Dieseljunaliikenteen ympäristökustannukset, mk/juna-km (1997 rahassa)

	Taajamat	Haja-asutus- alueet	Keskimäärin
Ympäristökustannukset, milj. mk/a	32,6	37,0	69,6
Suorite, milj. jkm	0,7	12,9	13,6
Haitta, mk/jkm	48	2,9	5,1

Taulukossa 5-22 dieselvetoisen rautatieliikenteen ympäristökustannukset on kohdistettu henkilö- ja tavaraliikenteelle ja niiden suoritteille taajamissa ja haja-asutusalueilla. Ympäristökustannukset arvioitiin 69,6 miljoonaksi markaksi vuodessa. Ne voidaan kohdistaa henkilö- ja tavaraliikenteelle suhteessa kokonaisbruttotonneihin (bt-km). Kun hain saatu haitta-arvio 9,8 milj. mk henkilöliikenteessä jaetaan dieselvetoisen henkilöliikenteen suoritteella 680 milj. hkm saadaan yksikköhaitaksi keskimäärin 14 mk/1000 hkm. Jakamalla tavaraliikenteen haitta-arvio 59,8 milj. mk suoritteella 4 711 milj. tkm saadaan yksikköhaitaksi keskimäärin 13 mk/1000 tkm. Nämä keskimääräiset haitta-arviot voidaan edelleen kohdistaa taajamille ja haja-asutusalueille suhteessa niissä ajettuihin juna-kilometreihin eli 5 % : 95 %. Henkilöliikenteessä dieselvetoisia juna-kilometrejä ajettiin 5,2 milj. jkm ja tavaraliikenteessä 8,3 milj. jkm vuonna 1996.

2. a'ale
oleellinen
haitto

henkilöliikenteelle saadaan 9,8 milj. mk

Vaikka

18 (17,7)
42 (41,5)

1,05
4,05

1,98
7,80

Taulukko 5-22 Dieseljunaliikenteen ympäristökustannukset, mk/henkilö-km ja mk/tonni-km (1997 rahassa)

1.

	Henkilöliikenne	Tavaraliikenne	Yhteensä
Haitta, milj. mk/a			69,6
Suorite, milj. bt-km	1 605	9 795	11 400
Haitta, milj. mk/a	9,8	59,8	69,6

3.

Henkilöliikenne	Taajamat	Haja-asutusalueet	Keskimäärin
Haitta, milj. mk/a	4,6	5,2	9,8
Suorite, milj. hkm			680
Haitta, mk/1000 hkm	55	2,9	14

12.5

8.05

4.

Tavaraliikenne	Taajamat	Haja-asutusalueet	Keskimäärin
Haitta, milj. mk/a	28,0	31,8	59,8
Suorite, milj. tkm			4 711
Haitta, mk/1000 tkm	30	1,6	13

112.9

7.1

5.2 Sähköjunaliikenteen aiheuttamat ympäristökustannukset

5.2.1 Sähkön hankinnan haitat

Haitan arviointi perustuu sähköjunaliikenteen käyttämän sähkön tuotannosta aiheutuneiden päästöjen aiheuttamiin haittoihin. Täten haittoja ei ole tarkoituksenmukaista eritellä taajamille ja haja-asutusalueille vaan tarkoituksenmukainen yksikkö on haitta käytettyä kilowattituntia kohden (p/kWh).

Vuonna 1994 valmistui SIHTI-ohjelman tutkimus Energiantuotannon ulkoisten kustannusten arvioiminen Suomessa (Energia-Ekono Oy ja Maa ja Vesi Oy 1994), jossa tehtiin ensimmäinen arvioita energiantuotannon polttoaineiden ympäristökustannuksista. Tässä selvityksessä vuodelle 1990 tehdyt arviot päivitettiin tutkimuksessa Tuulivoiman ja aurinkosähkön kilpailukyky ympäristöhyödyt huomioon ottaen (Energia-Ekono Oy 1998a). Näin saatiin arvio fossiilisiin polttoaineisiin perustuvan energiantuotannon aiheuttamista ympäristökustannuksista vuonna 1995. Tarkasteltavia vaikutuksia olivat terveysvaikutukset, materiaali-vaikutukset, muutokset metsän kasvussa, viljelykasvien sadossa sekä ilmastomuutos. Tutkimuksessa laskettiin yhden päästötonnin aiheuttama keskimääräinen taloudellinen haitta päästökomponentteittain. Tarkasteltavia päästökomponentteja olivat SO₂, NO_x, hiukkaset, NMVOC sekä kasvihuonekaasut CO₂, CH₄ ja N₂O.

Uudemmassa tutkimuksessa eri vaikutusten ympäristökustannukset arvioitiin seuraavan taulukon 5-23 mukaisiksi perustuen vuoden 1995 tuotantorakenteeseen. Tarkastelu pe-

rustui energian tuotantovaiheen päästöihin paitsi ilmastonmuutoksen osalta, jossa polttoaineketjujen kaikki vaiheet otettiin huomioon samanarvoisina. Taulukossa 5-23 vuoden 1995 tasolla arvioidut ympäristökustannukset on päivitetty vuoden 1997 tasolle kullekin haittakomponentille soveltuvin indekseihin.

Taulukko 5-23 Energiantuotannon ympäristökustannukset, muunnos vuoden 1995 rahasta vuoden 1997 rahaan, milj. mk/a

Haitta	1995 rahassa	Indeksi	Indeksi 1995	Indeksi 1997	1997 rahassa
Terveysvaikutukset	1 766	Kuluttaja-hinta	100	101,8	1 798
Materiaalien korroosio	51	Rakennus-kustannus	100	105,2	53
Materiaalien likaantuminen	18	Kuluttaja-hinta	100	101,8	19
Metsien happamoituminen	14	Tukkuhinta (raaka-aineet /puutavara)	100	101,3	14
Metsien otsonivauriot	10	Tukkuhinta (raaka-aineet /puutavara)	100	101,3	10
Satovauriot	12	Laskettu uudelleen vuoden 1997 hinnoin			11
Ilmastonmuutos	8 624	OECD-maiden BKT	109,3	115,7	9 128
Yhteensä, milj. mk/a	10 494				11 033

Samassa projektissa haitat arvioitiin myös vuoden 1995 mukaiseen tuotantorakenteesen perustuen tuotetulle energialle. Kokonaishaitta kohdistettiin erikseen sähkölle ja lämmölle. Sähkön osalta haitaksi saatiin 2,0 p/kWh, jos ilmastonmuutosta ei oteta huomioon ja 11,1 p/kWh jos se otetaan mukaan haitta-arvioon. Kun otetaan huomioon sähkön tuotanto muilla kuin fossiilisilla polttoaineilla sekä tuonti (ks. luku 3.2.2), voidaan tehtyä arviota korjata alaspäin 51 %. Tällöin haitaksi muodostuu 0,98 p/kWh ilman arviota ilmastonmuutoksen haitoista ja 5,4 p/kWh ne mukaan lukien vuoden 1995 hintatasolla. Vuoden 1997 tasolle tämä kustannus saadaan käyttämällä taulukossa 5-23 esitettyjen kokonaishaittojen suhdetta vuosien 1997 ja 1995 rahassa (1,90/1,87 miljardia ilman ilmastonmuutosta ja 11,0/10,5 miljardia se huomioiden). Tällöin sähkön tuotannon haitaksi vuoden 1997 hintatasolla saadaan 1,0 p/kWh ilman arviota ilmastonmuutoksen haitoista ja 5,7 p/kWh ne mukaan lukien. Käytetylle sähkölle haitta-arvioksi saadaan 5,8 p/kWh, kun huomioidaan 1,5 % siirtöhäviö.

5.2.2 Sähkön hankinnan polttoaineketjujen haitat

Arvoitaessa sähkön hankinnan polttoaineketjujen haittoja voidaan käyttää samoja haja-asutusalueille laadittuja yksikköhaittoja kuin dieselin polttoaineketjussa. Sähkön hankinnan polttoaineketjujen alkupään yhteenlasketut päästöt on esitetty taulukossa 3-8 ja

dieselin polttoaineketjun alkupään haittojen arvioinnissa käytettävät yksikkökustannukset on esitetty taulukossa 5-18.

Sähkön hankinnan polttoaineketjujen alkupäästä syntyi hengitettäviä hiukkasia eli PM_{10} vuoden 1996 sähkönhankinnalla noin 21 tonnia. PM_{10} on kokoluokaltaan suurempaa kuin dieselhiukkaset, jotka ovat kokoluokkaa $PM_{2.5}$. Valtaosa hiukkasten haitoista aiheutuu terveysvaikutuksista ja PM_{10} on haitallisuudeltaan noin 60 % $PM_{2.5}$:n haitallisuudesta. Tämän vuoksi dieselhiukkasille arvioitua 26 400 mk/t yksikköhaittaa haja-asutusalueilla voidaan pienentää 40 %.

Isompien hiukkasten päästöistä (TSP) valtaosa syntyy kivihiilen varasastointiin liittyvästä työkoneiden käytöstä. Myös kivihiilen tuotannosta ja kuljetuksesta syntyy jonkin verran kiintoainepäästöjä. Nämä aiheuttavat lähinnä likaantumista eivätkä juurikaan terveysvaikutuksia, joten pienemmille hiukkasille muodostettu yksikköarvo yliarvioisi haittaa hyvin paljon. Dieselhiukkasten päästöt ovat 69,1 tonnia vuodessa ja niiden aiheuttaman likaantumisen kustannuksiksi arvioitiin 190 000 mk vuodessa. Tällöin haitta olisi 2 750 mk/t. Käytetään tätä arviota myös TSP:n aiheuttamalle likaantumishaitalle.

Taulukko 5-24 Sähkön hankinnan polttoaineketjujen alkupään haitat (laskettu koko 494 GWh hankinnalle, mikä sisältää liikennöinnin ja infrastruktuurin sähkönkulutuksen sekä häviöt)

Komponentti	Päästö - t/a -	Haitta - mk/t -	Haitta - milj. mk/a -
SO ₂	20	9 400	0,18
NO _x	56	1 400	0,08
Hengitettävät hiukkaset (PM_{10})	9	15 800	0,15
TSP	116	2 750	0,32
CO	63	4	0,0002
Hiilivedyt (CH ₄ ja NMVOC)	234	720	0,17
CO ₂ ¹	(13 484)	191	(2,6) ¹
Haitta yhteensä, milj. mk/a			0,9

¹ Polttoaineketjujen alkupään vaiheiden hiilidioksidipäästöt on laskettu yhteen dieselvetureiden käytön päästöjen kanssa, sillä ilmastonmuutoksen kannalta ei ole merkitystä sillä, missä päästöt syntyvät. Myös haitta-arvio yhdistetään käytön päästöjen haitta-arvioon.

Sähkön hankinnan aiheuttamat ympäristökustannukset tuotantovaiheesta (tuotanto ja tuonti) ovat 5,7 p/kWh yksikkökustannuksella koko 494 GWh hankinnalle arvioituna yhteensä 28,3 milj. mk vuodessa. Tällöin polttoaineketjujen alkupään päästöt muodostavat 3,2 % lisäkustannuksen. Sähkönhankinnan kokonaiskustannukset ovat tällöin noin 29,2 milj. mk vuodessa, mikä sisältää liikennöinnin lisäksi sekä sähkö- että dieseljunaliikenteen tarvitseman infrastruktuurin sähkön käytön ja häviöt. Polttoaineketjujen alkupään haitta-arvioon liittyvää epävarmuutta on käsitelty luvussa 6.

5.2.3 Resuspension aiheuttama likaantuminen

Sähkönhankinnan haittojen lisäksi sähkövetoinen junaliikenne aiheuttaa resuspensiota, jonka likaantumisen aiheuttama haitta on laskettava mukaan kokonaishaittaan. Likaan-

tumishaitan arvioinnista on keskusteltu yksityiskohtaisemmin luvussa 5.1.4. Luvussa 4 koko rautatieliikenteen aiheuttamaksi resuspensioksi taajamissa arvioitiin $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja haja-asutusalueilla $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Diesel- ja sähkövetoisen junaliikenteen suoritteisiin suhteutettuna sähkövetoinen liikenne aiheuttaa siis $1,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pitoisuuden taajamissa ja $0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pitoisuuden haja-asutusalueilla. Tällainen jako pitää sisällään oletuksen ettei haitta riipu junatyypistä. Arvio on jonkinasteinen yksinkertaistus, sillä mm. junien nopeudet vaikuttavat haitan suuruuteen, mutta tätä vaikutusta ei ole tämän selvityksen puitteissa ollut mahdollista ottaa huomioon.

Edellä mainituilla pitoisuuksilla, 5,75 mk per 1 g/m³ yksikkökustannuksella asukasta kohden ja 150 000 altistuvalla väestöllä arvioksi haitasta saadaan 1,1 milj. mk vuodessa (1997 rahassa). Tästä haitasta 90 % aiheutuu taajamissa.

5.2.4 Yhteenveto sähköjunaliikenteen haitoista

Sähkövetoisen junaliikenteen kokonaishaitta muodostuu siis sähkön hankinnan päästöjen haitoista ja liikennöinnistä johtuvan resuspension haitoista. Sähkön hankinta taas koostuu liikennöinnistä, infrastruktuurin sähkönkäytöstä sekä näille kohdistuvista häviöistä. Lisäksi haittoja aiheutuu sähkön hankinnan polttoaineketjujen alkupäästä.

Taulukko 5-25 Yhteenveto sähköjunaliikenteen haitoista, milj. mk vuodessa (1997 rahassa)

	Kulutus - GWh -	Yksikköhaitta	Kustannus - milj. mk/a -
Liikennöinti	422	5,8 p/kWh	24,5
Resuspensio			1,1
Haitta yhteensä, milj. mk/a			25,6
Polttoaineketjujen alkupää (liikennöinnin sähkönkulutus)	+ 3,2 % • liikennöinnin sähkönkulutuksen haitta		0,8
Yhteensä ilman infrastruktuurin sähkönkulutusta, milj. mk/a			26,4
Infrastruktuurin sähkönkulutus	43	5,8 p/kWh	2,5
Polttoaineketjujen alkupää (infrastruktuurin sähkönkulutus)	+ 3,2 % • infrastruktuurin sähkönkulutuksen haitta		0,01
Yhteensä, milj. mk/a			28,9

5.2.5 Sähköjunaliikenteen aiheuttaman haitan kohdistaminen suoritteille

Sähkövetoisen junaliikenteen ympäristökustannusten kohdistaminen suoritteille erikseen taajamissa ja haja-asutusalueilla ei ole mielekästä, sillä pääosa vaikutuksista syntyy energiantuotannosta.

Sähkövetoisen junaliikenteen ympäristökustannuksiksi arvioitiin ilman infrastruktuurin sähkönkulutusta ja polttoaineketjujen alkupäätä 25,6 milj. markkaa vuodessa ja liiken-

nöinti oli 27,1 miljoonaa juna-kilometriä vuonna 1996. Tällöin yksikkökustannukseksi juna-kilometriä kohden saadaan 0,9 mk.

Kustannukset voidaan kohdistaa myös henkilö- ja tavaraliikenteelle ja niiden liikenne-suoritteille. Sähkövetoisessa junaliikenteessä kuljetettiin 15 397 kokonaisbruttotonni-km vuonna 1996, mikä jakautui henkilöliikenteelle 6 559 bt-km ja tavaraliikenteelle 8 828 bt-km. Kohdistettaessa 25,6 milj. mk ympäristökustannukset tällä suhteella henkilö- ja tavaraliikenteelle saadaan henkilöliikenteen haittoiksi 10,9 milj. mk/a ja tavaraliikenteen 14,7 milj. mk/a. Tämä voidaan jakaa edelleen suoritetta kohden. Yhteenvedo tuloksista on esitetty seuraavassa taulukossa 5-26.

Taulukko 5-26 Sähköjunaliikenteen ympäristökustannukset, mk/jkm, mk/hlö-km ja mk/tkm (1997 rahassa)

	Henkilöliikenne	Tavaraliikenne	Yhteensä
Haitta, milj. mk/a	10,9	14,7	25,6
Suorite, yksikkö	2 574 milj. hkm	4 095 milj. tkm	27,1 milj. jkm
Yksikköhaitta, mk/suorite	4,2 mk/1000 hkm	3,6 mk/1000 tkm	0,9 mk/jkm

6. TULOSTEN LUOTETTAVUUDEN ARVIOINTIA

6.1 Epävarmuustekijät

Saatuihin arvioihin ympäristökustannuksista liittyy merkittävää epävarmuutta. Tästä huolimatta niistä voidaan päätellä haittojen suuruusluokka ja myös se, mitkä vaikutukset ja päästökomponentit ovat todennäköisesti merkittävimpiä. Koska diesel- ja sähköve-toista liikennettä on tarkasteltu samalla menetelmällä, on mahdollista tehdä päätelmiä näiden keskinäisestä ympäristötaloudellisesta merkityksestä.

Epävarmuudet liittyvät päästö- ja pitoisuusarvioihin, altistus-vaikutusfunktioihin, yksikkökustannuksiin ja laskentakorkoon. Luotettavia funktioita ei myöskään toistaiseksi ole läheskään kaikille altistus-vaikutusyhteyksille kuten typen oksidien terveysvaiku-tuksille. Tämä saattaa johtaa haittojen aliarviointiin. Vähäisempi epävarmuuden lähde on inventaario altistuvista kohteista kuten väestö-, materiaali- ja satomäärät. Diesel- ja sähkövetoisen liikenteen ympäristökustannusarvioissa on hieman erilaisia epävarmuu-den lähteitä. Altistus-vaikutusfunktioihin, yksikkökustannuksiin ja laskentakorkoon liittyvät epävarmuudet ovat samat, mutta päästö- ja pitoisuusarvioiden epävarmuuksien lähteet poikkeavat jonkin verran.

Dieselvetoisen liikenteen päästöt otettiin RAILI 96-laskentajärjestelmästä. Päästöarviot perustuvat kahden käytössä olevien veturien valmistajien ilmoittamiin päästökertoimiin. Tiedot ovat varsin vanhoja ja VR:n vuonna 1998 aloittamien päästömittausten ensim-mäisten alustavien tulosten perusteella on todennäköistä, että päästöarviot tulevat jat-kossa ainakin hieman muuttumaan. Suomen sähköntuotannon päästöt tunnetaan tarkasti.

Pitoisuusarvioihin liittyy myös epävarmuuksia. Tieliikenteen aiheuttamista pitoisuuksista on sinänsä tyydyttävästi tietoa, mutta tämän tiedon yleistäminen Suomen taajamiin ja haja-asutusalueille on tulkinnanvaraista. Edelleen dieseljunaliikenteen aiheuttamien pitoisuuksien arvioiminen päästösuhteiden avulla tieliikenteen aiheuttamista pitoisuuksista on epävarmaa. Toisaalta erillisiä leviämismallilaskelmia ei ollut tämän projektin puitteissa mahdollista tehdä ja niihinkin sisältyy tyypillisesti muutaman kymmenen pro-sentin epävarmuus. Pitoisuusarvioiden tarkkuutta olisi kuitenkin mahdollista parantaa mallinnuksella ja mittauksilla.

On myös otettava huomioon, että junaliikenteen päästöt vapautuvat keskimäärin hieman korkeammalta tieliikenteeseen verrattuna. Rautatieliikenne aiheuttaa pitoisuuksia myös keskimäärin syrjäisemmissä paikoissa tieliikenteeseen verrattuna, jolloin on arvioitavis-sa että junaliikenteen aiheuttamille pitoisuuksille altistutaan keskimäärin vähemmän tieliikenteeseen verrattuna. Tällöin käytetyn arvottamismenetelmän antamat tulokset saattavat olla lieviä yliarvioita.

Sähköntuotannon aiheuttamat pitoisuudet on arvioitu tutkimuksessa, jossa arvioitiin Suomen energiantuotannon ympäristökustannukset (Energia-Ekono 1998a). Pitoisuuksien arviointiin liittyi samanlaisia epävarmuustekijöitä kuin tässä selvityksessä tehtyihin arvioihin dieselvetoisen rautatieliikenteen aiheuttamista pitoisuuksista. Pitoisuusarviot tehtiin arvioimalla vallitsevien epäpuhtauspitoisuuksien lähteet sektoreittain perustuen päästöjen alkuperään (kaukokulkeuma, energiantuotanto, liikenne, teollisuus jne.).

Energiantuotannon osalta käytettävissä oli mallinnustuloksia energiantuotannon aiheuttamista pitoisuuksista sekä pääkaupunkiseudulla että Tampereella, mikä paransi tehtyjen arvioiden luotettavuutta. Toisaalta tulosten yleistämiseen liittyy epävarmuutta.

Terveysvaikutusten arviointiin käytettävillä altistus-vaikutusfunktioille ja yksikkökustannuksille on yleensä tiedossa joko virherajat tai keskihajonta. Altistus-vaikutusfunktioiden luottamusvälit ovat tavallisesti huomattavasti pitoisuuden luottamusvälejä suurempia. Koska tässä selvityksessä ei kuitenkaan ollut mahdollista tehdä leviämismallilaskelmia, pitoisuuksien arviointiin liittyvä epävarmuus on vähintään samaa luokkaa kuin altistus-vaikutusfunktioihin liittyvä epävarmuus. Altistus-vaikutusfunktioiden tai maksuhalukkuusarvioiden siirto muualta Euroopasta tai Yhdysvalloista Suomen olosuhteisiin sisältää epävarmuutta.

Materiaalivaurioiden haitta-arvion virhe muodostuu pitoisuuden, altistuvien materiaalmäärien, altistus-vaikutusfunktioiden ja yksikköarvojen virheestä. Suomessa altistuvat materiaalmäärät on arvioitu skaalaamalla Tukholmassa inventoidut eri materiaalien määrät Suomen ja Tukholman asukaslukujen suhteessa. Tähän arvioon sisältyy virhemahdollisuus, jonka suuruudesta ei ole tarkkaa tietoa kuten ei myöskään altistus-vaikutusfunktioiden ja yksikköarvojen virheistä.

Metsävaurioihin sisältyy merkittävää epävarmuutta, jonka suuruuden arvioiminen ei kuitenkaan ole tällä hetkellä mahdollista. Merkittävimpiä virhelähde lienevät otsonin ja happamoitumisen arvioitiin käytetyt altistus-vaikutusfunktiot. Varsinkin otsonin metsiä vaurioittavan vaikutuksen tutkiminen on vasta alussa. Happamoitumista on tutkittu huomattavasti enemmän, mutta vielä ei ole kiistattomasti voitu osoittaa, kuinka suuren haitan nykyiset ja ennakoitavat päästötasot tulevat aiheuttamaan. Esitetyt arviot haitasta ovat lähinnä esimerkkilaskelmia, joiden lopputulos korkeintaan parhaimmillaan arvioi haitan suuruusluokkaa. Vaikka tulokset sisältävätkin huomattavaa epävarmuutta, on niistä pääteltävissä, että metsävaurioiden aiheuttamat taloudelliset menetykset ovat todennäköisesti selvästi pienemmät kuin esimerkiksi terveysvaikutusten.

Satotappioiden laskemisessa käytettyihin altistus-vaikutusfunktioihin sisältyi arvio virherajoista. Funktioiden lisäksi pieni virhemahdollisuus on viljelypinta-aloissa ja satomäärissä, joista on käytetty useampivuotisia keskiarvoja. Myös laskelmassa käytettyyn otsonipitoisuuteen sisältyy jonkin verran epävarmuutta. Lisäksi tietyn sektorin (energiantuotanto) tai liikennemuodon osuuden arviointi kaikista otsonin aiheuttamista satotappioista sisältää epävarmuutta.

Kasvihuonekaasujen aiheuttama ilmastonmuutos on erittäin monimutkainen ja monimuotoinen vaikutuskokonaisuus, josta ei vielä ole riittävästi tietoa kohtuullisten arvioiden tekemiseksi. Niinpä nyt esitetty arvio on luotettavuudeltaan hyvin epävarma. Lopputulos riippuu oleellisesti siitä, mitä laskentakorkoa käytetään. Ilmastonmuutoksen arvioitiin aiheuttavan noin puolet dieselvetoisen junaliikenteen ja noin kahdeksankymmentä prosenttia sähkövetoisen junaliikenteen ympäristökustannuksista vuonna 1996. On huomioitava, että tämä osuus ei ole vakio eri tarkasteluvuosina vaan riippuu hyvin voimakkaasti esimerkiksi sähkön tuotantorakenteesta. Tulos on myös hyvin herkkä pienillekin muutoksille käytettävässä yksikkökustannuksessa.

Taulukkoon 6-1 on koottu yhteenveto tulosten luotettavuudesta ja merkittävimmistä epävarmuustekijöistä. Useimpien vaikutusten kohdalla arvio perustuu tekijöiden subjektiiviseen käsitykseen, ei tarkkojen virherajojen laskentaan.

Taulukko 6-1 Yhteenveto tulosten luotettavuudesta (asteikko: erittäin heikko, heikko, kohtuullinen, hyvä, erittäin hyvä)

Vaikutus	Arvio luotettavuudesta	Merkittävimmät epävarmuustekijät
Terveysvaikutukset	kohtuullinen-hyvä	Altistus-vaikutusfunktiot, pitoisuus, yksikkökustannukset (oirekohtaisia eroja)
Materiaalihaitat, korroosio	hyvä	Arvioita ei ole tehty kaikille materiaaleille eikä epäpuhtauksille, materiaali-inventaario, pitoisuus
Materiaalihaitat, likaantuminen	kohtuullinen	Inventaario altistuvista kohteista, pitoisuus, yksikkökustannukset
Metsävauriot, happamoituminen	heikko	Altistus-vaikutusfunktiot, pitoisuus
Metsävauriot, otsoni	heikko	Altistus-vaikutusfunktiot, pitoisuus
Satovauriot	hyvä	Pitoisuus, arvioita ei ole tehty kaikille lajikkeille
Ilmastonmuutos	heikko	Mallin sisältämät epävarmuudet vaikuttavat yksikkökustannukseen

Polttoaineketjujen aiheuttamien ympäristökustannusten arvioinnissa on käytetty polttoaineen käyttövaiheessa arvioitua yksikköhaittaa päästötonnia kohden (mk/t) myös ketjujen alkupään vaiheissa. Täten saatu tulos on todennäköisesti arvio haitan ylärajasta. Tämä johtuu siitä, että suuri osa ketjun muiden kuin vaiheiden päästöistä syntyy asutuskustusten ulkopuolella esimerkiksi hiilikaivoksissa tai kuljetusten aikana merialueilla. Tällöin muiden kuin kasvihuonekaasujen kohdalla käytettävä yksikkökustannus yliarvioi haittaa, sillä juuri paikalliset terveysvaikutukset muodostavat ilmastonmuutoksen jälkeen valtaosan haitoista. Lisäksi tulisi ottaa huomioon hintatason vaihtelu eri maissa, mikä vaikuttaa yksikkökustannusten suuruuteen. Ei ole kuitenkaan mitään erityistä perustetta tehdä arviota siitä, miten suuri osa haitoista tulisi jättää ottamatta huomioon, joten tässä on päädytty käyttämään samoja yksikköarvoja myös ketjun muille vaiheille.

Suomessa syntyvät päästöt kulkeutuvat osittain Suomen rajojen ulkopuolelle, mutta tässä selvityksessä näiden aiheuttama haitta rajattiin tarkastelun ulkopuolelle.

6.2 Herkkyystarkastelu

Seuraavassa on pyritty numeerisesti arvioimaan tuloksiin sisältyvää epävarmuutta. Kappaleissa 6.2.1 - 6.2.8 tarkastellaan dieselvetoisen liikenteen ympäristökustannuksia. Kappaleessa 6.2.9 keskitytään sähkönhankinnan ympäristökustannusten arvottamisen epävarmuustekijöihin. Lopuksi kappaleessa 6.2.10 esitetään yhteenveto herkkyystarkastelun tuloksista.

6.2.1 Kuolleisuusriski

Tässä selvityksessä kuolleisuusriskiä on arvioitu ExternE-projektissa suositelluilla altistus-vaikutusfunktioilla ja yksikkökustannuksilla. ExternE:ssä eri terveysvaikutukset luokiteltiin kolmeen epävarmuusryhmään: A (korkea luotettavuus), B (keskinkertainen luotettavuus) tai C (heikko luotettavuus). Geometrinen standardikeskihajonta, joka huomioi arvottamisen kaikissa vaiheissa syntyvän epävarmuuden yhteensä, vaihteli luokitellun A:ssa 2,5 - 4, B:ssä 4 - 6 ja C:ssä 6 - 12. Kuolleisuusriskin arvioinnissa tulokset kuuluivat luokkaan B.

Arvioksi dieselvetoisen junaliikenteen aiheuttamasta kuolleisuusriskistä saatiin noin 25 milj. mk vuodessa. Käyttäen geometrisenä keskihajontana arvoa viisi saadaan 68 % luottamusvälillä matala arvio jakamalla todennäköinen arvio viidellä ja korkea arvio kertomalla se viidellä. Tällöin matalaksi arvioksi haitasta saadaan noin 5 milj. mk vuodessa ja korkeaksi arvioksi noin 126 milj. mk vuodessa.

Dieselvetoisen junaliikenteen haittoja arvioitiin paitsi dieselliikennöidyllä alueella, myös Etelä-Suomen läänin alueella, jonne osa päästöistä kulkeutuu. Noin 6 milj. mk/a haitta-arvioon tällä alueella päädyttiin soveltamalla alhaisempia, haja-asutusalueille käytettyjä pitoisuuksia. Jos tällä alueella arvioidut haitat jätettäisiin huomioimatta, saataisiin dieselvetoisen junaliikenteen aiheuttaman kuolleisuusriskin kustannuksiksi noin 19 milj. mk vuodessa.

Seuraavassa on esitetty toinen herkkyystarkastelu, jossa käytetyt muuttujat on esitetty taulukossa 6-2. Pitoisuuden osalta tarkastellaan tilannetta, joissa altistuspitoisuudet olisivat puolet arvioiduista (taulukko 4-1) tai kaksinkertaiset. Matalassa arviossa altistuvasta väestöstä on vähennetty Etelä-Suomen läänin (kaukokulkeuma-alueen) väestö sekä puolet dieselliikennöidyn alueen väestöstä ja korkeassa arviossa samaa väestöä kuin perustarkastelussa. Altistus-vaikutusfunktioiden osalta matala ja korkea arvio on suoritettu ExternE:ssä raportoituhiin funktioihin liittyvien epävarmuuksien mukaan. Yksikkökustannusten matala ja korkea arvio on myös otettu ExternE:stä (Euroopan komissio 1997a). Taulukossa 6-3 on esitetty näillä oletuksilla saatu korkea ja matala arvio sekä perustarkasteluissa käytetty arvio.

Taulukko 6-2 Kuolleisuusriskin herkkyystarkastelussa käytettävät lähtöoletukset

Muuttuja	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Pitoisuudet	- 50 %	Ks taulukko 4-1	+ 100 %
Altistuva väestö	- Etelä-Suomen läänin väestö - 50 % muusta väestöstä	Ks. taulukko 5-1	Sama kuin käytetyssä arviossa
Altistus-vaikutusfunktiot	- 30 %	Ks. taulukko 5-2	+ 30 %
Yksikkökustannukset/mk	YOLL 347 000 tapaus 422 000	YOLL 485 000 tapaus 668 000	YOLL 563 000 tapaus 1 344 000

Taulukko 6-3 Dieseljunalikenteestä johtuvan kuolleisuuden aiheuttama haitta, milj. mk/a (1997 rahassa)

	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Taajamat	2,0	16	49
Haja-asutusalueet	0,4	3	10
Etelä-Suomen lääni	0	6	19
Yhteensä	2,4	25	79

On epätodennäköistä, että kaikki matalaan tai korkeaan arvioon johtavat oletukset toteutuvat samanaikaisesti. Esimerkiksi pelkän pitoisuuden varioiminen taulukon 6-2 mukaisesti johtaa matalaan arvioon 12,5 milj. mk vuodessa ja korkeaan arvioon 50 milj. mk vuodessa.

6.2.2 Sairastuvuusriski

Tässä selvityksessä sairastuvuusriskiä on arvioitu ExternE-projektissa suositelluilla altistus-vaikutusfunktioilla. Yksikkökustannuksina on käytetty osittain suomalaisessa contingent valuation -tutkimuksessa muodostettuja ja osittain ExternE:ssä käytettyjä yksikkökustannuksia. ExternE:ssä luokiteltiin arviot eri terveysvaikutusten kustannuksista kolmeen epävarmuusryhmään: A (korkea luotettavuus), B (keskinkertainen luotettavuus) tai C (heikko luotettavuus). Geometrinen standardikeskihajonta, joka huomioi arvottamisen kaikissa vaiheissa syntyvän epävarmuuden yhteensä, vaihteli luokittain ollen A:ssa 2,5 - 4, B:ssä 4 - 6 ja C:ssä 6 - 12. Kaikki arviot terveysvaikutuksista luokiteltiin ryhmään A tai B.

Arvioksi dieselvetoisen junaliikenteen aiheuttamasta sairastuvuusriskistä saatiin noin 5 milj. mk vuodessa. Käyttäen kunkin vaikutuksen geometristä keskihajontaa saadaan 68 % luotamusvälillä matala arvio jakamalla todennäköinen arvio jakamalla ja korkea arvio kertomalla se geometrisellä keskihajonnalla. Kun luokassa A käytetään kolmea ja luokassa B viittä geometrisenä keskihajontana, saadaan matalaksi arvioksi haitasta noin 1,4 milj. mk vuodessa ja korkeaksi arvioksi noin 18 milj. mk vuodessa.

Dieselvetoisen junaliikenteen haittoja arvioitiin paitsi dieselliikennöidyllä alueella, myös Etelä-Suomen läänin alueella, jonne osa päästöistä kulkeutuu. Noin 1,2 milj. mk/a haitta-arvioon tällä alueella päädyttiin soveltamalla alhaisempia, haja-asutusalueille käytettyjä pitoisuuksia. Jos tällä alueella arvioidut haitat jätettäisiin huomioimatta, saataisiin dieselvetoisen junaliikenteen aiheuttaman sairastuvuusriskin kustannuksiksi noin 3,7 milj. mk vuodessa.

Seuraavassa on esitetty toinen herkkyystarkastelu, jossa käytetyt muuttujat on esitetty taulukossa 6-4. Pitoisuuden osalta tarkastellaan tilannetta, joissa olisivat puolet arvioituista (taulukko 4-1) tai kaksinkertaiset. Matalassa arviossa altistuvasta väestöstä on vähennetty Etelä-Suomen läänin (kaukokulkeuma-alueen) väestö sekä puolet dieselliikennöidyn alueen väestöstä. Altistus-vaikutusfunktioiden osalta matala ja korkea arvio on suoritettu ExternE:ssä (Euroopan komissio 1995) raportoituihin funktioihin liittyvien keskimääräisten epävarmuuksien mukaan.

Sairastuvuutta arvioitaessa merkittävimpiä oireita ovat hiukkasten aiheuttamat rajoittuneen toimintakyvyn päivät (RAD) ja uudet krooniset keuhkoputkentulehdustapaukset sekä otsonin aiheuttama oireilu. Näistä krooniselle keuhkoputkentulehdukselle käytetty yksikköarvo on otettu ExternE:stä, mutta muille on käytetty suomalaisessa contingent valuation -tutkimuksessa (Energia-Ekono 1998b) muodostettuja yksikköarvoja. Kroonisen keuhkoputkentulehduksen yksikköarvona käytettiin perustarkastelussa 600 000 mk, vaihteluvälin ollessa 360 000 - 965 000 mk. Suomalaisessa tutkimuksessa yksikköarvoille muodostettiin virherajat. RAD:n yksikköarvon vaihteluväliksi saatiin 215 - 1 084 mk todennäköisen arvon ollessa 568 mk ja oireilupäivien vaihteluväliksi 44 - 219 mk todennäköisen arvon ollessa 97 mk. Muille oireille käytettiin vaihteluvälinä 30 % perustarkastelussa käytettyä alhaisempaa ja korkeampaa yksikköarvoa.

Taulukossa 6-5 on esitetty näillä oletuksilla saatu korkea ja matala arvio sekä perustarkasteluissa käytetty arvio.

Taulukko 6-4 Sairastuvuusriskin herkkyystarkastelussa käytettävät lähtöoletukset

Muuttuja	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Pitoisuudet	- 50 %	Ks taulukko 4-1	+ 100 %
Altistuva väestö	- Etelä-Suomen läänin väestö - 50 % muusta väestöstä	Ks. taulukko 5-1	Sama kuin käytetyssä arviossa
Altistus-vaikutusfunktiot	- 30 %	Ks. taulukko 5-6	+ 30 %
Yksikkökustannukset	Ks. teksti	Ks. taulukko 5-6	Ks. teksti

Taulukko 6-5 Dieseljunaliikenteestä johtuvan sairastuvuuden aiheuttama haitta, milj. mk/a (1997 rahassa)

	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Taajamat	0,3	3	12
Haja-asutusalueet	0,1	1	5
Etelä-Suomen lääni	0,01	1	6
Yhteensä	0,4	5	23

On epätodennäköistä, että kaikki matalaan tai korkeaan arvioon johtavat oletukset toteutuvat samanaikaisesti. Esimerkiksi pelkän pitoisuuden varioiminen taulukon 6-4 mukaisesti johtaa matalaan arvioon 2,5 milj. mk vuodessa ja korkeaan arvioon 10 milj. mk vuodessa.

6.2.3 Rakennusmateriaalien rapautuminen

Rakennusmateriaalivaurioita arvioitaessa epävarmuustekijöitä ovat a) käytetyt yksikkökustannukset, b) arvio materiaalmääristä (riippuu väestömääristä) sekä c) altistuspitoisuudet. Tässä selvityksessä haitat on arvioitu neljälletoista erilaiselle materiaalille, mutta ulkoilmalle altistuvia erilaisia materiaaleja on enemmän. Tämä johtaa haitan aliarvioin-

tiin, mutta tätä tekijää ei ole ollut mahdollista ottaa tässä herkkyystarkastelussa mukaan. Toinen haittojen aliarvioimiseen johtava tekijä on se, että haitta-arviot on voitu esittää vain rikkidioksidin aiheuttamille materiaalivaurioille, mutta myös muut ilman epäpuh-
taudet aiheuttavat materiaalien syöpmistä.

Herkkyystarkastelu on esitetty taulukossa 6-7 perustuen taulukossa 6-6 esitettyihin oletuksiin.

Taulukko 6-6 Rikkidioksidin aiheuttamien materiaalivaurioiden herkkyystarkastelussa käytettävät lähtöoletukset

Muuttuja	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Yksikkökustannus	- 20 %	Ks. taulukko 5-10	+ 20 %
Päästöille altistuva väestö/materiaalit	- 50 %	Koko väestö	Koko väestö
Pitoisuus	- 50 %	Taajamat 0,012 µg/m ³ Haja-as. 0,0065 µg/m ³	+ 100 %

Taulukko 6-7 Dieseljunaaliikenteestä johtuvien materiaalivaurioiden aiheuttama haitta, mk/a (1997 rahassa)

	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Taajamat	29 5000	147 000	354 000
Haja-asutusalueet	8 400	42 000	100 000
Yhteensä	38 000	189 000	454 000

On epätodennäköistä, että kaikki matalaan tai korkeaan arvioon johtavat oletukset toteutuvat samanaikaisesti.

6.2.4 Likaantuminen

Likaantumishaittaa arvioitaessa epävarmuustekijöitä ovat a) käytetty yksikkökustannus, b) altistuvat väestömäärät, joista altistuvien kohteiden määrän katsotaan riippuvan sekä c) altistuspitoisuudet. Haitta-arvio riippuu näistä kustakin muuttujasta lineaarisesti.

Taulukossa 6-9 esitetään likaantumishaitan ympäristökustannuksille luvussa 5.1.4 esitetyn keskimmäisen arvion lisäksi matala ja korkea arvio. Arviot perustuvat seuraavan taulukon 6-8 mukaisiin oletuksiin.

Tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että on epätodennäköistä, että kaikki matalaan tai korkeaan arvioon johtavat oletukset toteutuvat samanaikaisesti.

Taulukko 6-8 Likaantumishaitan herkkyystarkastelussa käytettävät lähtöoletukset

Muuttuja	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Yksikkökustannus	- 50 %	5,75 mk per 1 µg/m ³ per henkilö	+ 100 %
Päästöille altistuva väestö	- 50 %	Koko väestö	Koko väestö
Resuspensiolle altistuva väestö	150 000	150 000	+ 100 %
Pitoisuus	- 50 %	Ks. taulukko 5-12	+ 100 %

Taulukko 6-9 Dieseljunaliikenteen aiheuttama likaantumishaitta, milj. mk/a (1997 rahassa)

	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Taajamat	0,20	1,1	6,4
Haja-asutusalueet	0,01	0,1	0,4
Yhteensä	0,2	1,2	6,8

6.2.5 Happamoittavan laskeuman aiheuttamat metsävauriot

Happamoittavan laskeuman aiheuttamien metsävaurioiden arvioinnissa epävarmuustekijöitä ovat a) altistus-vaikutusfunktio ja b) rautatieliikenteen osuuden arviointi happamoittavan laskeuman aiheuttamista kokonaisvaurioista sekä c) käytettävä laskentakorko. Eri puulajien määrä ja vuotuinen kasvu ovat hyvin tiedossa ja yksikkökustannuksina on käytetty markkinahintoja.

Taulukossa 6-10 on esitetty herkkyystarkastelussa käytetyt oletukset sekä muuttujia varioimalla saadut arviot haitasta. Tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että on epätodennäköistä, että kaikki matalaan tai korkeaan arvioon johtavat oletukset toteutuvat samanaikaisesti.

Taulukko 6-10 Dieseljunaliikenteestä johtuvan happamoittavan laskeuman aiheuttamien metsävaurioiden haitan herkkyystarkastelussa käytetyt lähtöoletukset ja arvio haitasta, milj. mk/a (1997 rahassa)

	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Altistus-vaikutusfunktio	- 50 %	Ks. luku 5.1.6	+ 100 %
Dieseljunaliikenteen osuus happamoittavista päästöistä	- 30 %	Ks. luku 5.1.6	+ 30 %
Haitta, milj. mk/a	0,09	0,2	0,6

Myös pelkän laskentakoron varioiminen muuttaa arviota. Perustarkastelussa on käytetty laskentakorkoa 1 %. Jos muut perustarkastelussa käytetyt oletukset pidettäisiin voimassa, mutta laskentakorko olisi 0 %, olisi haitta-arvio 0,3 milj. mk vuodessa. Kolmen prosentin laskentakorolla haitta-arvioksi saataisiin 0,16 milj. mk vuodessa. Laskentakorko vaikuttaa kuitenkin haitta-arvioon vähemmän kuin muut oletukset ja yhden prosentin laskentakorko on kuitenkin varsin perusteltu haitan pitkäaikaisen luonteen ja sukupolvi-tasa-arvoisuuden periaatteen perusteella. Tämän vuoksi laskentakorko on jätetty pois taulukossa 6-10 esitetystä herkkyystarkastelusta.

6.2.6 Otsonin aiheuttamat metsävauriot

Otsonin aiheuttamien metsävaurioiden arvioinnissa epävarmuustekijöitä ovat a) altistusvaikutusfunktiot ja b) rautatieliikenteen osuuden arviointi otsonin aiheuttamista kokonaisvaurioista sekä c) tarkastelun aikajänne. Eri puulajien määrä ja vuotuinen kasvu ovat hyvin tiedossa ja yksikkökustannuksina on käytetty markkinahintoja.

Käytetty altistus-vaikutusfunktio on luonteeltaan hyvin alustava, joten siihen sisältyy merkittävä virhemahdollisuus. Myös eri puulajeille on jouduttu käyttämään samaa altistus-vaikutusfunktiota. Rautatieliikenteen osuuden arviointi otsonin aiheuttamista kokonaisvaurioista on jossain määrin epävarmaa, sillä käytettävissä ei ole ollut otsonimal-lia, vaan vaikutus otsonin muodostukseen on arvioitu suhteessa eri lähteistä syntyviin otsonia muodostaviin päästöihin. Haitta on myös arvioitu yksivuotisena, vaikka metsä-vaurioiden kohdalla haitta on todennäköisesti kumuloituva toisin kuin yksivuotisten viljelykasvien kohdalla. Tämä johtaa haitan aliarviointiin.

Taulukossa 6-11 on esitetty herkkyystarkastelussa käytetyt lähtöoletukset sekä muuttu-jia varioimalla saadut arviot haitasta. Tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että on epätodennäköistä, että kaikki matalaan tai korkeaan arvioon johtavat oletukset to-teutuvat samanaikaisesti.

Taulukko 6-11 Dieseljuniikenteestä johtuvien otsonipitoisuuksien aiheuttamien met-sävaurioiden haitan herkkyystarkastelussa käytetyt lähtöoletukset ja ar-vio haitasta, milj. mk/a (1997 rahassa)

	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Altistus-vaikutus-funktio	- 50 %	Ks. luku 5.1.6	+ 100 %
Dieseljuniikenteen osuus O ₃ muodostavista päästöistä	- 30 %	16 % kotimaiset lähteet 1,3 % NO _x ja 0,12 % VOC rautatieliikenteestä	+ 30 %
Haitta, milj. mk/a	0,3	0,8	2,1

6.2.7 Viljelykasvivauriot

Otsonin maanviljelykselle aiheuttamaa haittaa arvioitaessa merkittävimpiä epävarmuustekijöitä ovat a) otsonipitoisuus ja otsonin taustapitoisuus, b) altistusvaikutusfunktiot sekä c) arvio rautatieliikenteen osuudesta otsonin muodostumisessa.

Vähäisempiä epävarmuuden lähteitä ovat inventaario altistuvista sadoista sekä yksikköhinnot. Yksikköhintoina on ruokaviljojen osalta käytetty tuottajahintoja EU:n alueella ja rehujen osalta tuotantokustannuksia. Lisäksi kaikille lajikkeille ei ole laadittu altistusvaikutusfunktioita, mikä johtaa haittojen aliarvioimiseen. Huomiotta jätettyjä lajeja ovat mm. sokerijuurikas, öljykasvit, vihannekset, hedelmät ja marjat.

Taulukossa 6-13 esitetään satotappioiden ympäristökustannuksille luvussa 5.1.7 esitetyn perustarkastelun lisäksi matala ja korkea arvio. Arviot perustuvat taulukon 6-12 mukaisiin oletuksiin. Taulukossa 5-17 esitetty vaihteluväli otsonin aiheuttamien satovaurioiden kustannuksista pitää sisällään vain altistusvaikutusfunktioiden sisältämän epävarmuuden. Tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että on epätodennäköistä, että kaikki matalaan tai korkeaan arvioon johtavat oletukset toteutuvat samanaikaisesti.

Taulukko 6-12 Otsonin aiheuttamien satotappioiden herkkyystarkastelussa käytettävät lähtöoletukset

Muuttuja	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Pitoisuus	- 50 %	72,6 µg/m ³ eli 36,3 ppb	+ 100 %
Altistus-vaikutusfunktiot	Ks. taulukko 5-15	Ks. taulukko 5-15	Ks. taulukko 5-15
Dieseljunaliikenteen osuus O ₃ muodostavista päästöistä	- 30 %	16 % kotimaiset lähteet 1,3 % NO _x ja 0,12 % VOC rautatieliikenteestä	+ 30 %

Taulukko 6-13 Dieseljunaliikenteestä johtuvien otsonipitoisuuksien aiheuttamat satotappiot, mk/a (1997 rahassa)

	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Syysvehnä	200	4 000	57 000
Kevätvehnä	3 000	33 000	141 000
Syysruis	500	9 000	92 000
Ohra	3 000	33 000	141 000
Kaura	11 000	105 000	1 480 000
Peruna	11 000	131 000	553 000
Kuivaheinä	18 000	249 000	1 750 000
Säilörehu	4 000	49 000	344 000
Yhteensä	50 000	610 000	4 600 000

6.2.8 Ilmastonmuutos

Arvio haitasta perustui ExternE:ssä käytetyn FUND-mallin tuloksiin (Euroopan komissio 1997a ja 1997b). Malli sisälsi seuraavat ilmastonmuutoksen vaikutukset: terveys, maanviljelys, vesihuolto, merenpinnan nousu, ekosysteemit ja biodiversiteetti sekä katastrofit (tulvat, myrskyt yms.). Mallia sovellettiin IPCC:n esittämiin skenaarioihin.

Tieliikenteelle tehdyssä selvityksessä (Tielaitoksen toimeksiannosta Energia-Ekono 1997) hiilidioksiditonnille käytettiin yksikköarvoa 166 mk (1990 rahassa). Tähän oli päästy soveltamalla Fankhauserin (1994) kehittämää mallia käyttäen kuitenkin laskentakorkona 3 % (Maddison 1994). Tielaitokselle tehdyssä selvityksessä käytetty eri tutkimuksiin perustuva yksikköarvo on lähes sama kuin tässä selvityksessä käytetty, kun otetaan huomioon kustannustason muutos vuodesta 1990 vuoteen 1997.

Eräs lähestymistapa päästöjen arvottamiseen ovat taloudelliset ohjauskeinot. Ne heijastelevat yhteiskunnan maksuhalukkuutta välttää tiettyjä päästöjä. Hiilidioksiditoimikunta I:n mietinnössä (Komiteamietintö 1991:21) todetaan, että 150 markan vero hiilidioksiditonnilta saattaisi riittää pysäyttämään hiilidioksidipäästöjen kasvun.

Taulukossa 6-14 on esitetty FUND-mallin tuottamat hiilidioksidipäästöjen yksikköarvot, jotka on saatu laskentakorkoa varioimalla. Laskentakorko on tuloksiin merkittävimmän vaikuttava muuttuja. Eri yksikköarvoin saadut haitta-arviot on esitetty taulukossa 6-15.

Taulukko 6-14 Ilmastomuutoksen yksikkökustannusten vaihteluväli FUND-mallissa (perustarkastelussa käytetty yksikköarvo varjostettu)

	Matala arvio	Keskiarvo - mk/tonni CO ₂ -	Korkea arvio
95 % luottamusväli	23 (i = 5 %)	427	830 (i = 3 %)
Suppeampi luottamusväli	108 (i = 3 %)	191	275 (i = 1 %)

Taulukko 6-15 Dieselvetoisen junaliikenteen aiheuttaman ilmastomuutoksen vaihteluväli FUND-mallin yksikköarvoin (perustarkasteluun sisällytetty haitta-arvio varjostettu), milj. mk/a (1997 rahassa)

	Matala arvio	Keskiarvo - milj. mk / a -	Korkea arvio
95 % luottamusväli	4	81	158
Suppeampi luottamusväli	20	36	52

6.2.9 Sähkön hankinta

Sähkön hankinnan haitta-arvioiden epävarmuutta tarkasteltaessa epävarmuustekijöinä ovat kaikki taulukossa 6-1 esitetyt. Haitta-arvio on johdettu lähdetutkimuksesta (Energia Ekono Oy 1998a), jossa sähköntuotannon haitta-arviot on suoritettu samalla arvottamismenetelmällä kuin tässä selvityksessä on menetelty dieselvetoisen junaliikenteen päästöjen osalta.

Kun huomioon otetaan fossiilisiin ja biopolttoaineisiin perustuvan kotimaisen sähkön tuotannon lisäksi ydinvoima, vesivoima ja sähkön tuonti, haitta-arvioksi saadaan 5,8 p/kWh käytetylle sähkölle (siirtohäviöt otettu huomioon) tai 5,7 p/kWh tuotetulle

sähkölle. Käytetään seuraavassa tarkastelussa jälkimmäistä yksikköarvoa. Haitta-arviosta 4,7 p/kWh aiheutuu ilmastonmuutoksesta ja 1,0 p/kWh muista vaikutuksista.

Haitta-arviosta siis valtaosa muodostuu ilmastonmuutoksen haitoista. Muista haitoista merkittävimpiä ovat terveysvaikutukset. Tämän vuoksi näiden kahden tekijän tarkastelu antaa riittävän kuvan haitta-arvion vaihteluvälistä. Molempia vaikutuksia tarkastellaan Externe:ssä esitetyin periaattein, jotka on esitetty taulukossa 6-16.

Taulukko 6-16 Sähkön hankinnan haittojen tarkastelussa käytetyt oletukset

	Matala arvio	Keskiarvo	Korkea arvio
Terveysvaikutukset	Jaetaan viidellä	Ks. luvut 5.1.1 - 5.1.2	Kerrotaan viidellä
Ilmastonmuutos, suppeampi luottamusväli	108 (i = 3 %)	191	275 (i = 1 %)

Näillä oletuksilla päästään seuraaviin sähkön yksikköhintoihin (taulukko 6-17), joiden avulla taulukossa 6-18 esitetyt haitta-arviot on suoritettu. Haitta-arviossa on mukana infrastruktuurin sähkönkulutus.

Taulukko 6-17 Sähkön hankinnan yksikkökustannusten herkkyystarkastelu, p/kWh (1997 rahassa)

	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Terveysvaikutukset	0,2	1,0	5,0
Ilmastonmuutos	2,7	4,7	6,8
Haitta yhteensä, p/kWh	2,9	5,7	11,8

Taulukko 6-18 Sähkön hankinnan haittojen herkkyystarkastelu, milj. mk/a (1997 rahassa)

	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Sähkövetoinen junaliikenne	13	27	55
Dieselvetoinen junaliikenne	0,7	1,3	3
Haitta, milj. mk/a	14	28	58

6.2.10 Yhteenveto herkkyystarkastelun tuloksista

Tehtyjä matalia ja korkeita arvioita tarkasteltaessa on otettava huomioon, ettei ole todennäköistä, että kaikki näihin johtavat oletukset toteutuisivat samanaikaisesti. On myös epätodennäköistä että eri vaikutusten haitta-arvioita vertailtaessa näistä säännönmukaisesti toteutuisi matala tai korkea arvio. Matemaattisesti tällainen virhe voitaisiin välttää, mikäli kaikille erilaisille virheiden lähteille olisi tiedossa geometrinen keskihajonta.

Näitä tietyllä matemaattisella kaavalla yhdistelemällä olisi mahdollista päästä tarkem-
paan arvioon haitan ala- ja ylärajasta. Tällaiseen tarkasteluun ei ole kuitenkaan päästy,
sillä keskihajonnat eivät ole tiedossa kaikkien virhelähteiden osalta.

Saadut tulokset osoittavat kuitenkin haitta-arvion todennäköistä vaihteluväliä. Tämän
selvityksen perustarkastelussa on epävarmoissa tilanteissa valittu käyttöön useimmiten
varovainen arvio tarkasteltavista muuttujista. Perustutkimuksen edistyessä haitta-
arvioihin on todennäköisesti mahdollista ottaa mukaan lisää erilaisia vaikutuksia, joiden
kustannuksia tässä ei vielä ole ollut mahdollista arvioida riittävän luotettavien altistus-
vaikutusfunktioiden puuttuessa. Näin tulee todennäköisesti tapahtumaan erityisesti ter-
veysvaikutusten osalta. Erityisen kiinnostavaa suomalaisesta näkökulmasta on, millaisia
arvioita happamoitumisen ja otsonin aiheuttamille metsävaurioille jatkossa voidaan suo-
rittaa. Sen sijaan ilmastomuutoksen vaikutusten kustannusarvioiden kehittymisen
suunnasta on vielä tässä vaiheessa hyvin hankala tehdä päätelmiä.

*Taulukko 6-19 Yhteenveto rautatieliikenteen haitta-arvioihin liittyvästä epävarmuu-
desta, milj. mk/a (1997 rahassa). Tarkastelussa on mukana dieselpolt-
toaineen käyttö sekä liikennöinnin että infrastruktuurin sähkön käyttö.*

	Matala arvio	Käytetty arvio	Korkea arvio
Kuolleisuus	2	25	79
Sairastuvuus	0,3	5	23
Materiaalien rapautuminen	0,04	0,2	0,5
Likaantuminen	0,2	1,2	6,8
Metsien happamoituminen	0,09	0,2	0,6
Metsien otsonivauriot	0,3	0,8	2,1
Viljelykasvivauriot	0,05	0,6	4,6
Ilmastomuutos	20	36	52
Dieseljunalikenteen infra- struktuurin sähkönkäyttö	0,6	1,3	2,6
Dieseljunalikenteen haitat yhteensä, milj. mk/a	24	71	171
Sähköljalikenteen sähkön käyttö (liikennöinti ja infrastruktuuri)	13,5	27	55,6
Likaantuminen	0,3	1,1	8,5
Sähköljalikenteen haitat yhteensä, milj. mk/a	14	28	64
Yhteensä, milj. mk/a	38	99	235

7. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Vuonna 1996 rautatieliikenteen liikennesuorite oli yhteensä 40,6 miljoonaa junakilometriä, mistä 27,1 milj. jkm liikennöitiin sähkövetoisella kalustolla ja 13,6 milj. jkm dieselvetoisella kalustolla.

Dieselin kulutus oli 53 600 tonnia vuonna 1996. Tästä 8 700 tonnia arvioitiin kuluvan taajamissa ja 44 900 haja-asutusalueilla. Kokonaispolttoainekäytöstä syntyneet päästöt on tilastoitu RAILI 96-laskentajärjestelmässä.

Sähkövetoinen junaliikenne käytti sähköä liikennöintiin 422 GWh, infrastruktuuriin 43 GWh ja siirtohäviöiden osuus oli 7 GWh eli yhteensä 472 GWh vuonna 1996. Dieselvetoisen junaliikenteen tarvitseman infrastruktuurin kuluttama sähkö oli 22 GWh ja häviöihin kului 0,3 GWh. Liikennöinnin sähkönkäyttö oli siis 422 GWh, infrastruktuurin 65 GWh ja osuus valtakunnan verkon häviöistä noin 7 GWh, jolloin sähkön kokonaishankinnaksi muodostuu 494 GWh.

Dieselvetoisen junaliikenteen haitaksi arvioitiin 69,6 milj. mk vuodessa. Tästä terveysvaikutukset muodostivat 30,2 milj. mk, materiaalivauriot 1,4 milj. mk, luontovaikutukset 1,6 milj. mk ja ilmastomuutoksen haitat 36,4 milj. mk. Taajama-alueilla haitta arvioitiin 32,6 milj. markaksi vuodessa ja haja-asutusalueilla 37,0 milj. markaksi vuodessa.

Arvio sähkövetoisen junaliikenteen tarvitseman sähkön hankinnan haitoista perustui aiemmin samoin menetelmin tehtyyn selvitykseen, jossa arvioitiin Suomen energiantuotannon ympäristökustannukset (Energia-Ekono 1998a). Sähkön hankinnan haitoiksi arvioitiin käytetylle sähkölle siirtohäviöt huomioon ottaen 5,8 p/kWh ja vuositasolla yhteensä 24,5 miljoonaa markkaa. Tämän lisäksi liikennöinnin nostattaman pölyn eli resuspension arvioitiin aiheuttavan 1,1 milj. mk vuotuisen haitan, jolloin kokonaishaitat olisivat 25,6 milj. mk vuodessa.

Myös polttoaineketjuissa ennen käyttöä syntyvien päästöjen aiheuttamat haitat arvioitiin. Dieselvetoisen junaliikenteen osalta arvioitiin polttoaineketjujen alkupään haitat ottaen huomioon polttoaineen hankinta länsimaista ja Venäjältä. Sähkönhankinnassa otettiin huomioon kaikkien käytössä olevien fossiilisten polttoaineiden polttoaineketjut. Sekä dieselpolttoaineen että sähkönhankinnassa kasvuhuonekaasujen polttoaineketjun alkupään päästöt laskettiin yhteen käyttövaiheen päästöjen kanssa, sillä kyse on globaalista haitasta, jonka kohdalla ei ole merkitystä, missä päästöt syntyvät.

Dieselvetoisen junaliikenteen kohdalla öljynporauksen, kuljetusten, varastoinnin ja jakelun päästöt arvioitiin ja nämä arvotettiin käyttäen samoja yksikköhaittoja (mk/t) kuin käytön päästöt haja-asutusalueilla. Arvioksi polttoaineketjun alkupään haitoista saatiin noin 0,5 milj. mk vuodessa. Sähkönhankinnan polttoaineketjujen alkupään haitoiksi arvioitiin 0,8 milj. mk vuodessa.

Täten koko rautatieliikenteen yhteenlasketuiksi haitoiksi arvioitiin 96,5 milj. mk, josta polttoaineketjujen alkupäässä arvioitiin syntyvän yhteensä noin 1,3 milj. mk vuosihaitat. Lisäksi osa Suomessa syntyvistä päästöistä kulkeutuu ulkomaille, mutta niiden aiheuttamia kustannuksia ei ole tässä selvityksessä arvioitu. Yhteenveto haitta-arviosta on esitetty taulukossa 7-1.

*11/11/96
päästöt
laskettiin
sähkövetoisesta
kalustosta
22/11/96*